

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIEGO DE OLIVEIRA RABEL

EFEITO DO RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO NA RELAÇÃO SOLO,  
LITER E PLANTA DE *Pinus taeda* L. NO SUL DO BRASIL

CURITIBA

2019

DIEGO DE OLIVEIRA RABEL

EFEITO DO RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO NA RELAÇÃO SOLO,  
LITER E PLANTA DE *Pinus taeda* L. NO SUL DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. PhD. Antônio Carlos Vargas Motta

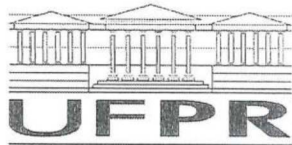
Co-orientador: Dr. Shizuo Maeda

CURITIBA

2019

R114e Rabel, Diego de Oliveira  
Efeito o resíduo alcalino de papel reciclado na relação solo, liter  
e planta de Pinus taeda no sul do Brasil / Diego de Oliveira Rabel.  
- Curitiba, 2019.  
54 p.: il.,  
  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor  
de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
do Solo.  
Orientador: Antônio Carlos Vargas Motta  
Coorientador: Shizuo Maeda  
  
1. Pinus taeda. 2. Acidez do solo. 3. Liteiras. I. Motta, Antônio  
Carlos Vargas (Orientador). II. Maeda, Shizuo (Coorientador). III.  
Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 633.94(816)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -  
40001016014P4


## TERMO DE APROVAÇÃO

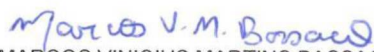
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DIEGO DE OLIVEIRA RABEL** intitulada: **Efeito do resíduo alcalino de papel reciclado na relação solo, litter e planta de *Pinus taeda* no Sul do Brasil**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Fevereiro de 2019.

  
ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
LETÍCIA DE PIERI  
Avaliador Externo (UFPR)

  
MARCOS VINICIUS MARTINS BASSACO  
Avaliador Externo (FJ)

Dedico essa Dissertação de mestrado a minha esposa, Luciani Antunes das Neves Rabel, que inicialmente apostou em mim. Sempre em parceria fizemos das situações mais desafiadoras, oportunidades de evolução, crescimento pessoal e profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os cidadãos brasileiros que ao pagarem seus impostos financiaram esta pesquisa e a minha formação, me proporcionando assim a oportunidade de estudar numa das melhores instituições do país. A Universidade Federal do Paraná e ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola pela estrutura para desenvolver minha pesquisa. A Embrapa pelo apoio financeiro ao projeto e pela disponibilização de uma área de pesquisa já instalada. A Companhia Cadham Volta Grande por ceder a área para realização do estudo, e colaboradores para coleta dos resultados. Ao Professor PhD. Antônio Carlos Vargas Motta, pela dedicação a este projeto, e a continua preocupação com a formação não só de cientistas mas também de cidadãos. Ao Dr. Shizuo Maeda que me deu a oportunidade de participar de uma investigação de mais de uma década de duração. Ao colega, Doutorando do Programa de Pós Graduação em Ciência do solo da UFPR Ederlan Magri, que dedicou seu tempo e conhecimento para me auxiliar ao longo deste trabalho. Ao colega mestrando do Programa de Pós Graduação em Ciência do solo da UFPR Cleiton Frigo, na realização dos trabalhos de campo e laboratório. Ao graduando em Engenharia Agrônômica da UFPR Guilherme Quaresma Pedreira, pelo auxílio nas rotinas laboratoriais. Ao Doutor Rangel Consalter pelo auxílio na definição de metodologias laboratoriais. As Servidoras técnicas administrativas Carla Gomes de Albuquerque e Fabiana Gavelaki pelo auxílio na execução das análises laboratoriais. Ao Professor Dr. Bruno Portela Brasileiro pelo auxílio nas análises estatísticas dos dados. A minha esposa Luciani Antunes das Neves Rabel pelo auxílio nos momentos chaves de execução deste estudo.

## RESUMO

O pinus (*Pinus taeda* L.), é cultivado nos mais variados solos, com produtividades relativamente altas no Brasil, porém ocorrem registros de deficiências nutricionais pela ausência do uso de fertilizantes e corretivos em solos muito ácidos e pobres em bases (Ca, Mg e K). Uma alternativa para a correção da acidez e adição de bases é o uso de resíduos alcalino de produção de papel reciclado (RAPR). Além de fornecer nutrientes ao solo a sua aplicação diminui o passivo ambiental, dando destino adequado a grande quantidade de produto gerado. O uso deste resíduo da indústria de papel reciclado, pode afetar o solo, a planta e a liteira. O objetivo deste estudo foi investigar o efeito de doses crescentes de RAPR em um plantio comercial de pinus da empresa Cadham Volta Grande em Rio Negrinho – SC, após 10 anos de sua aplicação. Os tratamentos foram constituídos das seguintes doses de resíduo alcalino de papel: 0, 10, 20, 30 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>, em delineamento de blocos ao acaso, com 4 repetições. Parâmetros de crescimento, nutrição, composição e quantidade de liteira e raízes, além de parâmetros químicos do solo foram mensurados no período de 10 anos da implantação do experimento. As análises dos tratamentos foram comparadas utilizando análise de variância seguido de teste de comparação de grupos de médias e ajustando equações de regressão onde o p-valor foi significativo. A aplicação do RAPR resultou em melhoria no crescimento e nutrição da planta (Ca, Zn, K e P) e diminuição de Al, com aumento de 16% no incremento médio anual. O RAPR não afetou o acúmulo total de massa de liteira, porém a enriqueceu com Ca, Cu e Zn no horizonte humificado (H). Houve um aumento no crescimento radicular com o uso de RAPR no horizonte H da liteira. Houve alteração do teor de elementos na raiz, aumentando Ca e a relação Ca/Al. Alterações no pH, teor de Ca e Al do solo ocorrem mesmo após 10 anos da aplicação do RAPR. A aplicação da dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> sobre a serapilheira de plantios estabelecidos promoveu maior crescimento e proporcionou efeito residual mesmo após 10 anos da aplicação. A aplicação de RAPR em plantios estabelecidos de *P. taeda* tem potencial para melhoria de produtividade. Palavras-chave: Pinus, cálcio, liteira, incremento médio anual.

## ABSTRACT

*Pinus (Pinus taeda L.)*, is cultivated in the most varied soils, with relatively high yields at Brazil, but there are records of nutritional deficiencies due to the absence of fertilizers and correctives in very acidic and poor soils. An alternative for the correction of acidity and addition of bases is the use of alkaline residues of recycled paper production (ARRP). In addition to providing nutrients to the soil, its application reduces the environmental liability, giving proper destination to the large quantity of product generated. The use of this waste from the recycled paper industry can affect the soil, plant and litter. The aims of this study were to investigate the effect of increasing doses of ARRP in a pine commercial plantation from Cadham Volta Grande company in Rio Negrinho municipality – Santa Catarina State, 10 years after its application. The treatments were composed of the following doses of paper alkaline residue: 0, 10, 20, 30 and 40 Mg ha<sup>-1</sup>, in a randomized block design, with 4 repetition. Several parameters of growth, nutrition, composition and amount of litter and roots, chemical properties of soil were measured in the period of 10 years from the implementation of the experiment. The analyzes of the treatments were done using analysis of variance followed by test of comparison of groups of means and adjusting regression equations where the p-value were significant. Application of ARRP improved the growth and plant nutrition. It did not affect the total mass accumulation of litter, but enriched it with Ca, Cu and Zn in the humidified horizon (H). There was increase in root growth with the use of ARRP in the H horizon of the litter. There was a change in the content of elements in the root, increasing Ca and Ca/Al ratio. Changes in pH, Ca and Al soil content occur even after 10 years of ARRP application. The use of the dose of 20 Mg ha<sup>-1</sup> on the planted litter has higher intensity and the same residual effect after 10 years of application. The application of ARRP in established forest of *P. taeda* has potential for productivity improvement.

Key-words: *Pinus*, calcium, litter, mean annual increment



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>14</b>
2.1 CARACTERÍSTICA DO LOCAL	14
2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	14
2.3 AVALIAÇÕES	15
2.3.1 Dados de crescimento	15
2.3.2 Coleta de acículas	16
2.3.3 Coleta e separação da liteira	16
2.3.4 Separação e mensuração das raízes	17
2.3.5 Obtenção de cinza e digestão das amostras	18
2.3.6 Variáveis de solo	19
2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	20
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>22</b>
3.1 RESULTADOS	22
3.1.1 Dados de crescimento	22
3.1.2 Efeito das doses de RAPR na composição química das acículas de pinus	23
3.1.3 Efeito das doses de RAPR na massa de liteira de pinus	24
3.1.4 Efeito das doses de RAPR na quantidade de cinzas da acícula e da liteira de Pinus	25
3.1.5 Efeito das doses de RAPR na composição química da liteira de pinus	27
3.1.6 Efeito das doses de RAPR na massa e comprimento de raízes	33
3.1.7 Efeito das doses de RAPR na composição química das raízes de pinus	34
3.1.8 Efeito das doses de RAPR nos parâmetros de solo	36
3.2 DISCUSSÃO	39
3.2.1 Dados de crescimento	39
3.2.2 Efeito das doses de RAPR na composição química das acículas de pinus	39
3.2.3 Efeito das doses de RAPR na massa de liteira de pinus	41
3.2.4 Efeito das doses de RAPR na quantidade de cinzas da acícula e da liteira de Pinus	42

3.2.5 Efeito das doses de RAPR na composição química da liteira de pinus .....	43
3.2.6 Efeito das doses de RAPR na massa e comprimento de raízes .....	45
3.2.7 Efeito das doses de RAPR na composição química das raízes de pinus .....	46
3.2.8 Efeito das doses de RAPR nos parâmetros de solo .....	47
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O *Pinus taeda* L. é originário da região sul dos Estados Unidos da América, com ocorrência natural registrada em 14 estados (BAKKER; LANGDON, 1990), sendo a espécie com maior área cultivada das espécies florestais daquele país, com algo entre 10 e 11,7 milhões de hectares (BAKKER; LANGDON, 1990; ROBERTSON et al., 2011). Por se adaptar bem às condições climáticas subtropicais (MOTTA et al., 2014), com boa rusticidade e normalmente com ausência de sintomas de deficiência (FERREIRA et al., 2001), ocupa aproximadamente 2,0 milhões de hectares no Brasil (IBGE, 2017), dos quais 84,7% está concentrado na Região Sul do país (ABRAF, 2013; IBA, 2015).

A produção de papel a partir da reciclagem consiste em uma atividade geradora de resíduo de característica alcalina, o qual necessita ser destinado a aterros industriais (BELLOTE et al., 1998). Estes aterros geram custos tanto de implantação quanto de manutenção, além de demandar cuidados com relação a possíveis contaminações ambientais. Neste sentido, existe a busca de outras alternativas para a destinação deste resíduo.

A grande maioria das áreas comerciais de pinus no Brasil são implantadas em solos geralmente ácidos e de baixa fertilidade natural, (REISSMANN, 2002), sem a utilização de técnicas de correção ou de manutenção da fertilidade (FERREIRA et al, 2001). Esse é um dos fatores que ocasionam incrementos médios anuais (IMA) abaixo dos  $32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  no Brasil, considerados como índice de alta produtividade (MORO et al., 2014; SANQUETTA et al., 2018). Uma alternativa viável para corrigir esses índices baixos, seria o uso do resíduo supracitado como corretivo de acidez do solo bem como para o fornecimento de nutrientes às plantas (Ferraz et al., 2016). Considerando que normalmente os plantios de pinus estão localizados próximos às indústrias, a sua aplicação nestas florestas torna-se mais barata que a utilização de calcário e elimina os gastos com aterro sanitário (ALMEIDA et al., 2008).

O resíduo alcalino de papel reciclado (RAPR) proporciona aumento do pH, CTC e da quantidade de Ca no solo, e consequentemente diminui o Al tóxico (COSTA et al., 2009; BALBINOT Jr. et al., 2014; MAEDA; GOMES; BOGNOLA, 2018), este efeito pode atingir camadas mais profundas (COSTA et al, 2009), assemelhando-se com o efeito do calcário. No entanto, os resultados de produtividade no pinus com uso de resíduo são inconclusivos e muitas vezes contraditórios, podendo não haver efeito (MAEDA et al., 2011; PÉRTILE et al., 2012),

haver efeito positivo em doses altas (RODRIGUEZ et al., 2018), ou benéficos em doses relativamente baixas (RODRIGUES et al., 2005; COSTA ET AL., 2009).

As alterações nos atributos químicos do solo interferem diretamente na nutrição das plantas. Sabe-se que os teores foliares dos nutrientes em árvores de *P. taeda* aumentam de acordo com a melhoria do solo (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2015), conseqüentemente ocorrem efeitos quantitativos e qualitativos na serapilheira. A simples pesagem da massa da serapilheira é a forma mais comum de quantificação. Porém diversos fatores podem acarretar em contaminação por solo no resíduo sobre o solo de floresta. O principal deles é a atividade de macro organismos. Sabe-se que a bioturbação pode revolver até 50 Mg ha<sup>-1</sup> de solo, e colocar este material junto com a serapilheira (WILKINSON; RICHARDS; HUMPHREYS, 2009). Porém, com a quantificação dos teores de cinzas presente nas diferentes frações da serapilheira, pode-se fazer a correção com o padrão conhecido (liter novo) com baixa contaminação, evitando assim a superestimação da massa das diferentes frações da liteira.

A serapilheira vem sendo utilizada como indicativo de qualidade de sítios florestais, pois a cobertura sob o solo florestal tem papel relevante na proteção e manutenção da biota do solo, além da ciclagem de nutrientes (KRISHNA; MOHAN 2017). A deposição de acículas ao longo do tempo sobre o solo florestal, e os diferentes e sucessivos estádios de decomposição promove a formação de horizontes da liteira (BABEL, 1971). Conforme o autor, os subhorizontes da liteira são: Ln (liter novo), Lv (liter velho ou alterado), Fr (resíduos de plantas), Fm (resíduos médios de plantas, presença de raízes), Hr (substância orgânica fina, partículas de acículas bem finas e raízes) e Hf (substância orgânica fina, presença de raízes). Estes variam em relação a concentração de elementos, onde a fração mais fragmentada da liteira pode atuar fortemente na retenção dos nutrientes (BATISTA et al., 2015).

É conhecido que a aplicação de corretivos e fertilizantes podem promover alterações na quantidade e qualidade da liteira (BELLOTE, 1998; PLATE, 2002; JANDL et al., 2003, BATISTA et al., 2015). Além disso, sabe-se que a quantidade de nutrientes presente no ambiente da rizosfera regula o crescimento das raízes de plantas florestais (LETHO, 1994; HELMISAARI; HALLBÄCKEN, 1999; BAKKER et al., 2009; WANG et al., 2016). Outro efeito da fertilização está correlacionado com a composição química das raízes (VANGUELOVA et al., 2007; AUGUSTO et al., 2015; GROBELAK et al., 2016; NGUYEN; AMYOT; LABRECQUE, 2017).

Embora existam trabalhos avaliando aplicação de RAPR em florestas de *P. taeda*, estes estão restritos a parâmetros químicos do solo e crescimento da cultura, sendo ainda de curta

duração. Visando contribuir no entendimento das implicações após 10 anos do uso de RAPR no cultivo de *P. taeda*, organizou-se a pesquisa aqui apresentada. Especificamente, avaliou-se: (i) crescimento e produtividade; (ii) nutrição; (iii) percentual de cinzas das acículas e liteira; (iv) quantidade e composição química da liteira; (v) quantidade e composição química das raízes presentes na liteira; (vi) alteração nos atributos químicos do solo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 CARACTERISTICA DO LOCAL

O experimento foi implantado em 2007, quando as árvores estavam com 3 anos de idade, localizado nas coordenadas 26°28'26.60"S 49°35'11.09"O, no município de Rio Negrinho estado de Santa Catarina, no sul do Brasil. A área de estudo corresponde a um plantio comercial com a espécie *P. taeda*, pertencente a indústria de celulose Cahdam Volta Grande (CVG), sendo a segunda rotação de Pinus na área.

O relevo da área experimental é suave ondulado, conforme classificação do IBGE (2015), com altitude de aproximadamente 935 m acima do nível do mar. O clima da região conforme classificação de Köppen se enquadra em Cfb – Mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos, sem estação seca definida, e com geadas severas frequentes. A temperatura média do mês mais quente é sempre inferior a 22 °C (ALVARES, et al., 2013). A área do estudo faz parte da Formação Rio do Sul (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 2014) e está instalada sobre Cambissolo Húmico Distrófico típico, cujo material de origem é o argilito. A análise do solo com base em amostra composta de 16 amostras de solos antes da implantação do experimento, pode ser observada na TABELA 1.

TABELA 1. PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO A PARTIR DAS AMOSTRAS COLETADAS NO TRATAMENTO CONTROLE DO EXPERIMENTO NO ANO DE 2008.

Profundidade cm	Areia ..... g kg <sup>-1</sup> .....	Silte	Argila	C.O.	pH CaCl <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup> ..... cmol <sub>e</sub> dm <sup>-3</sup> .....	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al <sup>3+</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>
0-5	310	369	322	37,05	3,85	0,09	0,28	0,12	4,61	17,90	2,00
5-10	313	378	310	34,44	3,92	nd	0,27	0,09	4,30	15,01	1,16
10-20	322	375	303	31,45	3,96	nd	0,14	0,08	4,43	14,29	0,69
20-40	366	338	297	30,36	3,97	nd	0,08	0,06	3,95	13,76	0,09

nd: não detectado.

### 2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foram aplicadas manualmente 5 doses de resíduo, calculadas considerando RAPR com 40% de matéria seca. Tais doses consistiram nos tratamentos: T1 - Controle (0 Mg ha<sup>-1</sup>); T2 - 10 Mg ha<sup>-1</sup>; T3 - 20 Mg ha<sup>-1</sup>; T4 - 30 Mg ha<sup>-1</sup>; T5 - 40 Mg ha<sup>-1</sup> de RAPR. O resíduo aplicado foi caracterizado por Maeda et al. (2011), e pode ser observado na TABELA 2.

TABELA 2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (RAPR) GERADO NO PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE RECICLAGEM DE PAPEL DA INDÚSTRIA DE CELULOSE CAHDAM VOLTA GRANDE (CVG).

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
pH em água	8,6	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	150,04
Cinzas (g kg <sup>-1</sup> )	555	K (g kg <sup>-1</sup> )	0,14
C total (g kg <sup>-1</sup> )	238	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	1,76
N total (g kg <sup>-1</sup> )	0,3	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	2480,00
S total (g kg <sup>-1</sup> )	0,4	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	44,35
P total (g kg <sup>-1</sup> )	2,3	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	49,14
Al (g kg <sup>-1</sup> )	13,3	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	265,22

Os tratamentos foram distribuídos na área experimental considerando delineamento em blocos ao acaso com 4 repetições. Cada parcela foi constituída 25 árvores, com espaçamento de 3 metros na linha e na entrelinha, totalizando 225m<sup>2</sup> por parcela. Entre as parcelas, respeitou-se o espaçamento de uma linha como bordadura.

## 2.3 AVALIAÇÕES

### 2.3.1 Dados de crescimento

Foram mensuradas sistematicamente o diâmetro na altura do peito (DAP) a 1,30 m a partir do nível do solo, e a altura total (HT) das 9 árvores centrais de cada parcela nos anos de 2007 a 2013 e em 2016. Para mensuração do DAP, foi utilizado uma trena métrica, e para a HT foi utilizado hipsômetro eletrônico modelo HANGLÖF.

No ano de 2018 foi colhida uma árvore por parcela, sendo esta a árvore com o volume mais próximo a média de cada parcela, com base na avaliação de 2016. Estas tiveram a mensuração do DAP e altura comercial (HC) utilizando trena, para posterior cubagem das árvores e obtenção do volume. Para a obtenção da HC foi considerado o caule até o diâmetro de 8 cm. No cálculo do volume, a árvore foi medida em 15 pontos diferentes do caule (0,5, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 95% da altura total), o volume das seções foram calculadas conforme metodologia de Smalian, sendo acumuladas para gerar o volume das árvores inteiras segundo a seguinte fórmula:

$$V = \frac{\pi (A + a)}{4} \left[ \frac{A + a}{2} \right] \cdot L$$

Onde:

V = Volume da seção do tronco;

A = Área transversal da seção de maior diâmetro;

a = Área transversal da seção de menor diâmetro;

L = Comprimento da seção;

A área transversal de cada seção é dada pela expressão:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Onde  $\pi = 3,1416$ ;

d = diâmetro da seção.

Após o cálculo de volume por árvore, foi extrapolado para um hectare e depois dividido pelo número de anos de vida da floresta, obtendo assim o incremento médio anual por hectare (IMA).

### 2.3.2 Coleta de acículas

Foram coletadas acículas nos anos de 2008 e 2018. Em 2008, foram coletadas acículas do segundo lançamento no terço superior da copa, nos 4 pontos cardeais. O primeiro e segundo lançamento são as acículas correspondentes a primeira e segunda emissão de acículas feita pela espécie na estação de crescimento. Esta coleta foi efetuada em todas as árvores das parcelas. Já em 2018, foram coletadas acículas de primeiro e segundo lançamento, também dos 4 pontos cardeais do terço superior, contudo apenas da árvore abatida de cada parcela. Não foi possível coletar acículas de todas as árvores devido à altura das mesmas. As acículas foram lavadas com água deionizada, secas em estufa com circulação de ar à 60 °C até atingirem peso constante, e na sequência moídas em moedor portátil com lâminas tipo faca.

### 2.3.3 Coleta e separação da liteira

Foram coletados aleatoriamente 4 amostras de liteira em cada parcela, utilizando um gabarito de 12 por 18 centímetros. O gabarito foi posicionado sobre a liteira, e com uma lamina de aço foram efetuados cortes até atingir o solo. A liteira externa ao gabarito foi removida e descartada, restando apenas as frações de liter na área conhecida. Este material foi recolhido



em saco plástico, mantendo os horizontes da liteira intactos. No laboratório com ambiente bem iluminado, foram separados os diferentes subhorizontes de liter, de acordo com a morfologia descrita por Babel (1972), sendo elas: liter novo (Ln); liter velho (Lv); primeiro e segundo subhorizontes de liter fragmentado (Fr e Fm), bem como o horizonte liter humificado (H).

Após a separação visual, os subhorizontes Fr, Fm e o horizonte H passaram por um processo de separação por peneiras. Inicialmente foram submetidos à malha de 2 mm, e posteriormente em peneira de 1 mm. Desta forma, cada um destes foi dividido em três frações: Fr < 1 mm (Fr Fina), Fr entre 1 e 2 mm (Fr Média), e Fr > 2 mm (Fr grossa); Fm < 1 mm (Fm Fina), Fm entre 1 e 2 mm (Fm Média), e Fm > 2 mm (Fm Grossa); H menor que 1 mm (H Fina), H entre 1 e 2 mm (H média), e H > 2 mm (H grossa). Após a realização das separações, as diferentes frações do liter foram colocados para secar em estufa a 40° C até atingir peso constante. O material seco foi utilizado para calcular a massa de liteira por hectare de cada horizonte e fração, conforme fórmula a seguir:

$$MSL = \frac{(Mkg \cdot 10000)}{(0,12 \cdot 0,18)}$$

Onde:

MSL = Massa seca de liteira em kg ha<sup>-1</sup>;

Mkg = Massa da amostra em kg.

Após isso essa massa foi corrigida pelo teor de cinzas, para desconsiderar a contaminação ocorrida pelo solo ou pelo RAPR. Foi utilizado como padrão para correção o teor de cinzas do subhorizonte Ln de cada tratamento, conforme a equação a seguir:

$$MSc = MSL \cdot \left[ \frac{(100 - (CA - CLn))}{100} \right]$$

Onde:

MSc = Massa seca da amostra corrigida em kg ha<sup>-1</sup>;

MSL = Massa seca de liteira em kg ha<sup>-1</sup>;

CA = Quantidade de cinzas da amostra em %;

CLn = Quantidade de cinzas do Liter novo do tratamento correspondente.

#### 2.3.4 Separação e mensuração das raízes

A quantidade de raízes foi estimada a partir das frações Fr, Fm e H que ficaram retidas na peneira de 2 mm. No subhorizonte Fr foi utilizada toda a amostra de liter para separar as raízes. Já no subhorizonte Fm e no horizonte H, foi utilizado a metade da massa de liter existente para separar as raízes presentes. Após a separação das raízes, estas foram digitalizadas em 300 d.p.i. em scanner marca HP Deskjet 2540, e analisadas no software Safira (Sistema de Análise de Fibras e Raízes) (Jorge e Rodrigues, 2008) para obtenção do valor de comprimento total de raiz. Após escaneadas, elas foram secas e pesadas, determinando a massa de raízes por hectare (MR) e o comprimento de raízes por hectare (CR), utilizando o valor obtido na amostra em relação a massa de liter de cada camada, conforme fórmulas a seguir:

$$MR = \frac{(MAR. MSL)}{(Mkg)}$$

Onde:

MR = Massa de raízes kg ha<sup>-1</sup>;

MAR = Massa de raízes na amostra em kg;

MSL = Massa seca de liteira em kg ha<sup>-1</sup>;

Mkg = Massa da amostra em kg.

$$CR = \frac{\frac{(CAR. MSL)}{(Mkg)}}{1000}$$

Onde:

CR = Comprimento de raízes mil km ha<sup>-1</sup>;

CAR = Comprimento de raízes na amostra em km;

MSL = Massa seca de liteira em kg ha<sup>-1</sup>;

Mkg = Massa da amostra em kg.

### 2.3.5 Obtenção de cinza e digestão das amostras

As amostras de liteira, acículas e raízes foram solubilizadas para análise química segundo metodologia descrita por Martins e Reissmann (2007). Aproximadamente 1 g de material foi adicionado em mufla, por 3 horas. Em seguida foram adicionadas 3 gotas de ácido clorídrico (HCl) 3 N, retornando para a mufla por mais 3 horas a 500 °C. Após, com as amostras já resfriadas, foram adicionados 10 mL de HCl 3 N, colocadas em chapa pré-aquecida a 200 °C, para aquecer por 10 minutos. Após estes procedimentos, as amostras foram filtradas e os

extratos foram completados a um volume de 100 mL com água deionizada. Para obtenção do teor de cinzas das acículas coletadas em 2018 e da liteira, antes de ir para a mufla o material e os cadinhos foram pesados. Após as 3 primeiras horas na mufla, o material foi retirado e colocado em dissecador, ao esfriar foi determinado a massa das cinzas, que foi transformada em porcentagem em relação a massa seca, conforme fórmula a seguir:

$$\text{Cinzas \%} = \frac{((MCA - C) \cdot 100)}{MA - C}$$

Onde:

Cinzas % = percentual de cinzas presente na amostra;

MCA = Massa de cinzas após 3 horas de mufla;

MA = Massa da amostra colocada no cadinho;

C = Massa do cadinho.

Os extratos da solubilização tanto da liteira, quanto de acículas e raízes foram analisados por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES) (Varian, 720- ES) no laboratório de Química e Fertilidade do Solo do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná. Foram determinados os teores de Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Fósforo (P), Potássio (K), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Cobre (Cu).

### 2.3.6 Variáveis de solo

Foram coletadas amostras de solo em 4 pontos de cada parcela, nos anos de 2008, 2012 e 2017. Foram amostradas as seguintes profundidades: 0 a 5 cm; 5 a 10 cm; 10 a 20 cm; 20 a 30 para os anos de 2008 e 2012. Para 2017, além das 3 primeiras camadas foram avaliadas as camadas de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm. Para se evitar a contaminação, foram cavadas mini trincheiras de 50 cm de lado com 20 cm de profundidade, sempre bem centralizadas nas parcelas. Após as trincheiras abertas, foram coletadas com auxílio de trado as amostras de 20 a 30 para os anos de 2008 e 2012, e de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm para o ano de 2017. Na sequência, foram coletadas as amostras de 0-5, 5-10, 10-20 cm com uma espátula.

Foram feitas análises químicas na terra fina seca ao ar no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da Universidade Federal do Paraná. As variáveis analisadas foram pH (pH

$\text{CaCl}_2$  0,01M, com relação de 1:2,5); Alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ), Cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e Magnésio trocável ( $\text{Mg}^{2+}$ ) extraídos por KCl 1 mol  $\text{L}^{-1}$ . Além destas, avaliou-se Potássio trocável ( $\text{K}^+$ ) e Fósforo disponível (P) extraídos por Melich I. O  $\text{Al}^{3+}$  foi determinado por titulação com NaOH 0,2 mol  $\text{L}^{-1}$ , e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis determinados por espectrofotometria de absorção atômica;  $\text{K}^+$  trocável e P disponível extraídos por Mehlich I, sendo o primeiro determinado por fotometria de chama e o segundo por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES) (Varian, 720- ES).

## 2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística todas as variáveis foram submetidas ao teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias. Para as variáveis que apresentaram heterocedasticidade das variâncias, os dados foram transformados de acordo com a sua distribuição. Para os dados de IMA, HC, DAP (coletado em 2018), Al, Ca, Mg, P, K, Fe, Mn, Zn e Cu (na acícula), a análise foi realizada considerando o seguinte modelo estatístico:  $Y_{ij} = m + T_i + B_j + E_{ij}$ , onde:  $Y_{ij}$ : valores observados na parcela que recebeu o tratamento  $i$  no bloco  $j$ ;  $m$ : média geral  $T_i$ : efeito do tratamento  $i$ ;  $B_j$ : efeito do bloco  $j$ ;  $E_{ij}$ : efeito do erro experimental associada a parcela que recebeu o tratamento  $i$  no bloco  $j$ . Para as variáveis DAP, HT, as de solo pH,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , P e cinzas de acículas de primeiro e segundo lançamento e das diferentes frações da liteira (Ln, Lv, Fr Fina, Fr Média, Fr Grossa; Fm Fina, Fm Média, Fm Grossa; H Fina, H Média, H Grossa), elementos na liteira e raízes (Al, Ca, Mg, P, K, Fe, Mn, Zn e Cu), foi adotado o seguinte modelo estatístico:  $Y_{ijk} = m + A_i + B_j + (AB)_{ij} + CK + (AC)_{ik} + E_{ijk}$   $Y_{ijk}$ : valores observados na parcela que recebeu o nível  $i$  do fator  $a$  e o nível  $k$  do fator  $c$  no bloco  $j$ ;  $m$ : média geral  $a_i$ : o efeito do nível  $i$  do fator  $a$ ;  $b_j$ : efeito do bloco  $j$ ;  $(ab)_{ij}$ : efeito do erro experimental associado a parcela que recebeu o nível  $i$  do fator  $a$  no bloco  $j$  (resíduo  $a$ );  $ck$ : efeito do nível  $k$  do fator  $c$ ;  $(ac)_{ik}$ : efeito da interação do nível  $i$  do fator  $a$  com o nível  $k$  do fator  $c$ ;  $e_{ijk}$ : efeito do erro experimental associada a subparcela que recebeu o nível  $i$  do fator  $a$  e o nível  $k$  do fator  $c$  no bloco  $j$  (resíduo  $b$ ). Onde o efeito do nível  $i$  do fator  $a$  correspondeu as diferentes doses e o efeito do nível  $k$  do fator  $c$  correspondeu aos diferentes anos para as variáveis DAP e HT e as diferentes camadas do solo para pH,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , P e subhorizontes e horizontes de liteira para cinzas, elementos na liteira e raízes (Al, Ca, Mg, P, K, Fe, Mn, Zn e Cu). Para as variáveis que apresentaram efeitos significativos para

os fatores quantitativos e qualitativos de acordo com o teste F da ANOVA a 5% de probabilidade, foram realizadas respectivamente, análises de regressão e o teste de Scott-Knott. Foram efetuadas as análises de agrupamento de Cluster e Análise de Componente Principal (PCA) a partir dos parâmetros químicos e quantidade de cinzas dos diferentes horizontes e frações da liteira, para a testemunha ( $0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e para a dose máxima ( $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Todas as análises estatísticas foram executadas com auxílio do software R, versão 3.4.1 (TEAM, 2014).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 RESULTADOS

##### 3.1.1 Dados de crescimento

Não houve efeito ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) das doses de resíduo nos diferentes anos de avaliação nas variáveis HT e DAP. Porém, houve diferença significativa ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) entre os anos para HT e DAP (TABELA 3).

TABELA 3. ALTURA TOTAL (HT) E CIRCUNFERÊNCIA NA ALTURA DO PEITO (DAP) DAS ÁRVORES DE *P. TAEDA* CULTIVADO SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 MG HA<sup>-1</sup> DE RAPR) DE 2007) ATÉ 2013 E 2016, NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

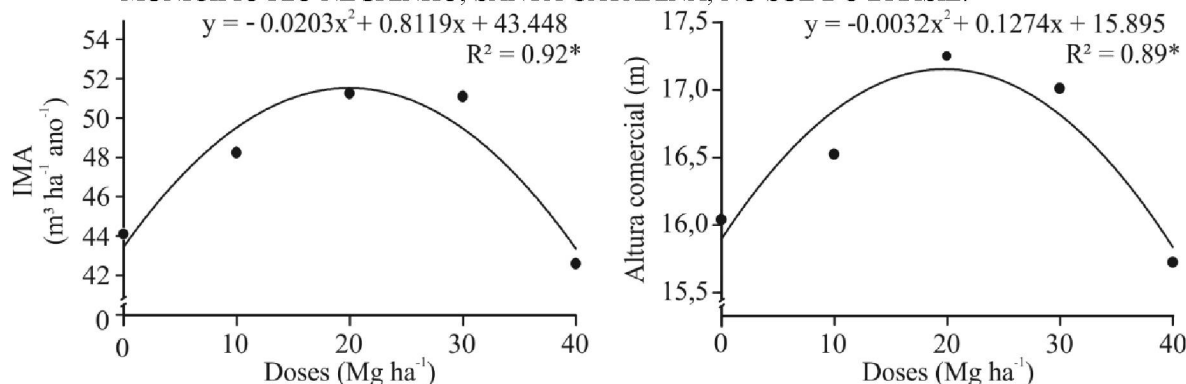
Ano	Dose (Mg ha <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	30	40
<i>HT (m)</i>					
2007	4,08A	4,14A	4,24A	4,27A	3,92A
2008	6,13A	5,98A	6,30A	6,25A	5,91A
2009	7,74A	7,77A	8,12A	7,96A	7,57A
2010	9,23A	9,39A	9,53A	9,44A	8,93A
2011	10,45A	10,46A	10,87A	10,82A	10,43A
2012	12,24A	12,44A	12,87A	12,81A	12,44A
2013	13,66A	13,78A	14,43A	14,31A	13,97A
2016	16,94A	17,95A	17,82A	17,83A	17,34A
<i>DAP(cm)</i>					
2007	7,06A	7,26A	7,49A	7,52A	6,96A
2008	12,22A	12,37A	12,97A	12,94A	12,23A
2009	15,77A	15,71A	16,23A	16,24A	15,41A
2010	18,26A	18,46A	18,86A	18,79A	18,17A
2011	20,06A	20,37A	20,69A	20,76A	20,58A
2012	21,63A	22,20A	22,61A	22,67A	22,41A
2013	22,21A	22,85A	22,94A	23,19A	23,17A
2016	25,20A	26,93A	25,97A	26,88A	26,79A

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas não diferem entre si de acordo com teste SK a 5% de probabilidade.

No décimo ano após aplicação do resíduo (2018), momento da colheita, houve um efeito significativo ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) das doses aplicadas no IMA e na altura comercial (HC), sendo que até a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> houve um incremento no IMA e HC (FIGURA 1). Os incrementos

máximos obtidos ficaram em cerca de 16% em relação a dose zero para IMA. As equações ajustadas apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,89 (FIGURA 1).

FIGURA 1. INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) (A) E ALTURA COMERCIAL (B) DAS ÁRVORES DE *P. TAEDA* ABATIDAS NO ANO DE 2018, EM FUNÇÃO DAS DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.



### 3.1.2 Efeito das doses de RAPR na composição química das acículas de pinus

O efeito do uso de resíduo sobre a nutrição da planta variou em função dos anos de avaliação (TABELA 4). Em 2008, os resultados indicaram apenas mudança na concentração de Ca, havendo um aumento (TABELA 5) até a dose de 30 Mg ha<sup>-1</sup> de RAPR.

Em 2018, foi constatado aumento de Ca no primeiro e segundo lançamento, sendo estes lineares (TABELA 5). Nas doses acima de 20 Mg ha<sup>-1</sup> esse aumento ultrapassou duas vezes o valor observado para testemunha (TABELA 4). Houve também aumento quadrático (TABELA 5) nas concentrações de Zn para o primeiro e segundo lançamentos, até a dose de 30 Mg ha<sup>-1</sup> (TABELA 4). Para o K, houve aumentos na concentração somente no primeiro lançamento, e estes foram lineares (TABELA 5). Análise de acículas do segundo lançamento mostraram aumento de P até a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Ao se analisar o Al, nota-se que até a dose de 30 Mg ha<sup>-1</sup> houve diminuição dos teores com a aplicação de resíduo.

TABELA 4. PORCENTAGEM DE CINZA E TEORES MÉDIOS DE Al, Ca, Mg, K, P, Fe, Mn, Zn E Cu DE ACÍCULAS DE PRIMEIRO LANÇAMENTO (2018) E SEGUNDO LANÇAMENTO (2008 E 2018) DE ÁRVORES DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

Dose	Cinza	Al	Ca	Mg	K	P	Fe	Mn	Zn	Cu
Mg ha <sup>-1</sup>	%	----- g kg <sup>-1</sup> -----				----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Segundo Lançamento de 2008										
0	-	-	2,75b	0,78a	3,54a	0,84a	201a	257a	22,1a	3,14a
10	-	-	3,49a	0,74a	3,41a	0,87a	205a	243a	19,5a	3,41a
20	-	-	3,94a	0,82a	3,69a	0,86a	211a	237a	20,3a	3,28a
30	-	-	4,02a	0,78a	3,32a	0,84a	222a	260a	20,3a	3,12a
40	-	-	3,88a	0,73a	3,20a	0,86a	219a	291a	22,0a	3,63a
Primeiro Lançamento de 2018										
0	2,4a	0,62a*	0,74d	0,69a	4,06b	1,06a	160a	123a	20,8a	4,81a
10	2,0b	0,49b	1,27c	0,62a	4,49b	1,12a	96b	91a	27,7a	4,66a
20	1,8c	0,41c	1,49b	0,60a	4,37b	1,17a	118b	99a	25,5a	4,67a
30	2,1b	0,40c	1,74a	0,65a	4,79a	1,10a	105b	117a	30,2a	5,03a
40	2,2b	0,53b	1,97a	0,60a	5,18a	1,11a	197a	73a	28,1a	4,44a
Segundo Lançamento de 2018										
0	2,0c	0,41a	*0,60b	0,77a	6,25a	1,30b	90a	113a	24,5b	5,69a
10	2,5b	0,34b	1,06a	0,72a	6,46a	1,44a	77b	85a	30,1a	5,73a
20	2,0c	0,30b	1,25a	0,74a	6,00a	1,47a	69b	103a	31,4a	6,55a
30	2,7a	0,30b	1,36a	0,68a	6,53a	1,30b	63b	89a	32,9a	4,99a
40	2,1c	0,36a	1,57a	0,76a	5,94a	1,27b	89a	106a	23,2b	4,37a

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas não diferem entre si de acordo com teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. \*Para a realização dos testes estatísticos os dados transformados utilizando log (X).

### 3.1.3 Efeito das doses de RAPR na massa de liteira de pinus

A quantidade total de liter apresentou tendência similar ao parâmetro crescimento, apresentando maiores valores da dose intermediária de 20 Mg ha<sup>-1</sup>. Contudo, houve diferença entre as massas de liter nas coletas realizadas no horizonte H e subhorizonte Fr ambos na fração média e fina (TABELA 6). Somente nas camadas do horizonte H foram possíveis ajustar equações de regressão visando determinar as relações funcionais entre as doses e a massa do liter. Na fração mais fina do H, os aumentos em relação a aplicação do RAPR foram lineares (TABELA 8). Percebe-se que a aplicação do resíduo não alterou a quantidade de acículas recém caídas. Porém, a taxa de permanência do liter nas frações humificadas foi alterada, no entanto sem interferir na massa total de liter (TABELA 6). As frações liter novo e velho não foram alteradas pela aplicação, sendo que estas somadas correspondem a 20% da massa total de liter. O subhorizonte Fr corresponde entre 11 e 14% da massa total, sendo que a granulometria mais



grossa é mais importante neste horizonte e esta não foi influenciada pela aplicação do resíduo. Neste subhorizonte a fração média aumentou com a aplicação dos resíduos. No subhorizonte Fm a granulometria grossa apresenta maior quantidade de massa. As diferentes granulometrias mantem a mesma proporção no horizonte H.

TABELA 5. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO RELATIVAS A ALTERAÇÕES DE COMPOSIÇÃO DAS ACÍCULAS DE PRIMEIRO LANÇAMENTO (2018) E SEGUNDO LANÇAMENTO (2008 E 2018) DE ÁRVORES DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

Lançamento de acículas e ano	Variável	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
2º lançamento 2008	Ca	$y = 2.7493 + 0.0889 x - 0.0015 x^2$	0.99 **
1º lançamento 2018	Ca	$y = 0.8609 + 0.0292 x$	0.97 **
	K	$y = 4.0661 + 0.0256 x$	0.89 **
	Fe	$y = 158.26 - 7.0963 x + 0.1981 x^2$	0.86 **
	Zn	$y = 21.426 + 0.4899 x + 0.008 x^2$	0.74 *
	Al	$y = 0.6298 - 0.0198x + 0.0004 x^2$	0.97**
	% Cinza	$2.3584 - 0.0428 x + 0.001 x^2$	0.80**
2º lançamento 2018	Ca	$0.7187 + 0.0225 x$	0.93**
	P	$y = 1.322 + 0.0132x - 0.0004x^2$	0.70*
	Fe	$y = 91.941 - 2.3876x + 0.056x^2$	0.83**
	Zn	$y = 24.077 + 0.8677x - 0.0217x^2$	0.89*
	Al	$y = 0.4094 - 0.0101 x + 0.0002 x^2$	0.98**
	% Cinza	sem ajuste	-

### 3.1.4 Efeito das doses de RAPR na quantidade de cinzas da acícula e da liteira de Pinus Houve

interação significativa entre as doses de RAPR e as camadas da liteira para as variáveis massa e porcentagem de cinza. As porcentagens de cinza das acículas coletadas em 2018 apresentaram alterações com a aplicação do RAPR (TABELA 4). Para o primeiro lançamento, houve diminuição no percentual de cinzas até a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>.

O teor de cinza da liteira variou em função da idade, granulometria e aplicação do resíduo. Sendo direta e inversamente proporcional a idade e granulometria respectivamente. O percentual médio de cinza no Ln e nas acículas são semelhantes, já no Lv esse valor praticamente duplica (TABELA 6). Com relação a granulometria, as maiores diferenças nos

TABELA 6. MASSA CORRIGIDA E PORCENTAGEM DE CINZA NOS HORIZONTES DA LITEIRA: LITER NOVO (Ln), LITER VELHO (Lv); E NAS FRAÇÕES FINA, MÉDIA E GROSSA DOS SUBHORIZONTES PRIMEIRO E SEGUNDO FRAGMENTADO (FR E FM), E LITER HUMIFICADO (H); EM PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

Dose	Frações da liteira											Total
(Mg ha <sup>-1</sup> )	Ln	Lv	Fr média	Fr fina	Fr grossa	Fm média	Fm fina	Fm grossa	H média	H fina	H grossa	
*Massa (kg ha <sup>-1</sup> )												
0	4934Aa	3265aB	1175bD	291bE	2588aB	3633aB	1943aC	7155aA	3059bB	2935bB	4806aA	35783a
10	3926aB	3776aB	811bD	314bE	3206aB	1999aC	1975aC	6589aA	3821bB	5761aA	5406aA	37583a
20	4726aA	3871aB	1702aD	458aE	3642aB	2869aC	2465aC	6566aA	5969aA	4938aA	4919aA	42124a
30	4793aA	4466aA	1268bD	471aE	3837aA	2561aB	2007aC	5762aA	5455aA	5062aA	4662aA	40344a
40	4372aA	3406aB	1818aC	512aD	3168aB	1915aC	2584aB	4292aA	4983aA	6342aA	6326aA	39501a
*Cinza (%)												
0	2,15bI	4,13bH	6,23cF	15,26dD	5,68bG	8,80cE	23,28bC	5,55cG	34,97bB	52,54aA	9,22dE	-
10	2,44aJ	4,57aI	8,50bG	17,48cD	5,90bH	13,79aE	24,90bC	8,22bG	38,28bB	52,70aA	11,59cF	-
20	2,51aJ	4,55aI	7,81bG	17,17cD	6,88aH	8,85cF	22,74bC	7,57bG	26,66cB	53,78aA	11,92cE	-
30	2,41aJ	4,71aI	9,36aF	27,06aC	6,56aH	9,48cF	22,94bD	8,16bG	36,95bB	55,74aA	17,10bE	-
40	2,66aI	5,04aH	9,65aF	22,43bd	6,35aG	11,69bE	29,48aC	9,29aF	45,33aB	57,61aA	20,82aD	-

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si de acordo com teste SK a 5% de probabilidade Ln Liter novo. Lv Liter velho. Fr grossa, fração maior que 2 mm do subhorizonte primeiro fragmentado da liteira. Fr média, fração entre 1 e 2 mm do subhorizonte primeiro fragmentado da liteira. Fr fina, fração menor que 1mm do subhorizonte primeiro fragmentado da liteira. Fm grossa, fração maior que 2 mm do subhorizonte segundo fragmentado da liteira. Fm média, fração entre 1 e 2 mm do subhorizonte segundo fragmentado da liteira. Fm fina, fração menor que 1mm do subhorizonte segundo fragmentado da liteira. H grossa, fração maior que 2 mm do horizonte humificado da liteira. H média, fração entre 1 e 2 mm do horizonte humificado da liteira. H fina, fração menor que 1mm do horizonte humificado da liteira. \*Para a realização dos testes estatísticos os dados transformados utilizando log (X)

subhorizontes fragmentados ocorrem entre a fração menor que 1 mm e as demais (TABELA 6). Já no horizonte humificado, o principal contraste se dá entre a fração maior que 2 mm e as demais. E em relação a aplicação de RAPR, todos tiveram seus teores de cinza aumentados exceto Ln, Lv e a granulometria fina horizonte humificado. No entanto, somente foi possível ajustar equações para Fr média e Fr grossa e H grossa todas com comportamento quadrático (TABELA 8).

### 3.1.5 Efeito das doses de RAPR na composição química da liteira de pinus

Houve uma tendência de empobrecimento das acículas caídas em K, P, Cu e Zn em relação as acículas coletadas nas plantas, porém isto não ocorreu com o Mg (TABELA 7). Outros elementos tenderam a se acumular no Ln são eles Ca, Al, Fe e Mn. A dinâmica de nutrientes foi alterada pela aplicação do resíduo, isso fica evidente quando analisamos o Ca, pois este tende a se perder ao longo dos horizontes mais velhos quando não há aplicação de RAPR. Porém, quando aplicado o resíduo na dose de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  ocorre manutenção dos teores de Ca, e a partir das demais doses ocorre um grande acréscimo desse nutriente. Houve aumento de Ca devido aos tratamentos em todas as frações do H, com efeitos positivos lineares nas frações mais finas e quadrático na fração grossa (TABELA 8). Os incrementos para o Ca são bem expressivos, chegando a mais de 68 vezes o teor encontrado na testemunha, para a fração média do H (TABELA 7).

Os teores de K e P tendem a se manter ao longo dos horizontes mais velhos, porém o K tende a se acumular nas frações mais finas dos horizontes Fr, Fm e H independente da aplicação do resíduo. Já o P foi alterado no horizonte Lv e na fração fina do Fr. O Mg tem uma dinâmica um tanto diferente dos demais, tende a se manter com teores semelhantes ao longo dos horizontes. Porém, a aplicação de resíduo promoveu alteração nas 3 frações do horizonte humificado, sendo que nas duas frações menores houve um acúmulo nos teores. Já o Cu aumentou ao longo dos horizontes, do mais novo para o mais velho.

O Mn apresentou o mesmo comportamento do Ca, na ausência da aplicação do resíduo os decréscimos são expressivos, e estes decréscimos se tornam menos expressivos com o aumento das doses. Houve diminuição dos teores de Mn no Lv e Ln com a aplicação do resíduo com ajuste de modelo quadrático, e alterações nas frações fina do Fr e grossa do Fm e claro aumento com efeito linear (TABELA 8) na fração fina do H. Quanto aos micronutrientes Zn e Cu, o uso do resíduo promoveu aumento lineares (exceto para Zn na fração grossa, onde o efeito

foi quadrático) (TABELA 8) dos teores em todas as frações do horizonte H, com acúmulo principalmente nas frações mais finas (FIGURA 2). Os teores de Zn foram reduzidos pela aplicação do resíduo na fração menor que 1 mm do subhorizonte Fr. O elemento Cu também sofreu alterações nos teores devido a aplicação de resíduos nos subhorizontes Ln e Lv.

Os elementos Fe e Al se acumularam em função da idade dos horizontes. Existe uma relação direta entre o teor de cinzas e a quantidade destes dois elementos, demonstrando que possivelmente estes advêm de contaminação externa ao liter (FIGURA 2). No entanto os teores de Al sofreram aumentos com o uso de resíduo, no Lv, frações média e fina subhorizonte Fr, frações grossa e fina do subhorizonte Fm, e frações grossa e média do horizonte H (TABELA 6). Foi possível ajustar equação de regressão somente para a fração grossa do horizonte H, sendo está linear e positiva (TABELA 8).

O agrupamento de Cluster formou grupos de similaridade das frações da liteira e acículas do primeiro e segundo lançamento de acordo com a composição química e porcentagem de cinzas (linhas tracejadas na FIGURA 2). De acordo com a PCA, há diferença entre os grupos formados no tratamento sem aplicação de resíduo ( $PC1= 42,1\%$  e  $PC2= 25,7\%$ ) bem como para a dose máxima ( $PC1= 55,1\%$  e  $PC2= 18,9\%$ ). Os coeficientes de associação das variáveis com os eixos (loadings) são observados na TABELA 9. Para o eixo 1 da PCA da dose  $0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , ficaram associados positivamente o Al, Fe, porcentagem de cinza, e negativamente o Mn. Já para o eixo 2, as principais variáveis são P e K. Com relação a dose  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$ , a principal alteração está associada aos elementos Zn, Cu e Ca, que aumentaram seus valores de explicação do eixo 1.

Quando verificado tal relação na ausência do resíduo e na dose máxima, apenas o grupo formado pelo primeiro e segundo lançamento de acículas mantearam-se inalterados. Quando não aplicado resíduo, o grupo com as frações do liter mais velhas e particuladas (Fm e H fina, e H média) apresentam relação com Al, Fe e quantidade de cinzas. Já na dose máxima, esse grupo passa a ser constituído por H fina e média, passando a apresentar relação com Zn, Cu e Ca, além dos citados anteriormente. O Ca na testemunha mostrava-se mais correlacionado com o grupo formado por Ln, Lv, Fr grossa e Fr média, frações mais novas da liteira. Em ambos os casos o primeiro e segundo lançamento estão associados aos elementos K e P (FIGURA 2).

TABELA 7. TEORES MÉDIOS DE Ca, Mg, K, P, Al, Fe, Mn, Zn E Cu NOS HORIZONTES DA LITEIRA: LITER NOVO (LN), LITER VELHO (LV); E NAS FRAÇÕES FINA, MÉDIA E GROSSA DOS SUBHORIZONTES PRIMEIRO E SEGUNDO FRAGMENTADO (FR E FM), E LITER HUMIFICADO (H); EM PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 MG HA<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL. (continua)

-----Frações da liteira-----											
Dose (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Ln	Lv	Fr grossa	Fr média	Fr fina	Fm grossa	Fm média	Fm fina	H grossa	H média	H fina
Ca (g kg <sup>-1</sup> )											
0	2.19aA	2.17aA	1.63aA	1.61aA	1.52aA	0.74aA	0.80aA	0.67aA	0.74bA	0.49dA	0.34dA
10	3.33aA	3.09aA	2.58aA	2.55aA	2.63aA	2.00aA	1.71aA	2.01aA	3.29bA	7.02cA	4.07cA
20	3.80aC	3.39aC	3.08aC	3.29aC	2.94aC	2.49aC	2.70aC	2.86aC	5.48aC	10.81bA	7.08cB
30	4.04aC	3.98aC	3.18aC	3.22aC	2.91aC	2.63aC	2.84aC	3.24aC	7.43aB	12.90bA	9.81bB
40	3.96aC	3.89aC	3.56aC	3.67aC	3.30aC	2.96aC	3.12Ac	3.24aC	7.53aC	33.92aA	15.48aB
Mg* (g kg <sup>-1</sup> )											
0	0.87aB	0.92aB	0.83aC	0.81aC	1.14Aa	0.63aD	0.75aC	0.80aC	0.64aD	0.70aC	0.73bC
10	0.78aB	0.90aB	0.85aB	0.88aB	1.20aA	0.68aC	0.71aC	0.86aB	0.57aD	0.79aB	0.71bC
20	0.75aC	0.85aB	0.84aB	0.88aB	1.10aA	0.59aD	0.59aD	0.69aC	0.50aD	0.66aC	0.75bC
30	0.70aB	0.97aA	0.90aA	0.89aA	1.00aA	0.65aB	0.65aB	0.81aA	0.59aB	0.87aA	0.89aA
40	0.74aC	0.92aB	0.97aB	0.97aB	1.28aA	0.73aC	0.72aC	0.89aB	0.65aC	1.19bA	1.00aB
K (g kg <sup>-1</sup> )											
0	0.58aA	0.58aA	0.58aA	0.55aA	1.09aA	0.66aA	0.62aA	0.86aA	0.63aA	0.85aA	1.05aA
10	0.55aA	0.60aA	0.55aA	0.60aA	0.98aA	0.66aA	0.64aA	0.89aA	0.68aA	1.04aA	1.15aA
20	0.60aA	0.55aA	0.55aA	0.57aA	0.88aA	0.61aA	0.57aA	0.79aA	0.53aA	0.79aA	1.10aA
30	0.48aA	0.69aA	0.63aA	0.62aA	0.90aA	0.62aA	0.59aA	0.83aA	0.64aA	0.83aA	1.03aA
40	0.65aA	0.71aA	0.62aA	0.70aA	0.96aA	0.61aA	0.63aA	0.87aA	0.66aA	0.81aA	1.07aA

TABELA 7. TEORES MÉDIOS DE Ca, Mg, K, P, Al, Fe, Mn, Zn E Cu NOS HORIZONTES DA LITEIRA: LITER NOVO (LN), LITER VELHO (LV); E NAS FRAÇÕES FINA, MÉDIA E GROSSA DOS SUBHORIZONTES PRIMEIRO E SEGUNDO FRAGMENTADO (FR E FM), E LITER HUMIFICADO (H); EM PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg Ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL. (continuação)

Dose (Mg.ha <sup>-1</sup> )	-----Frações da liteira-----										
	Ln	Lv	Fr grossa	Fr média	Fr fina	Fm grossa	Fm média	Fm fina	H grossa	H média	H fina
P (mg kg <sup>-1</sup> )											
0	0.29aE	0.39bD	0.50aC	0.58aB	0.72aA	0.40aD	0.43aD	0.47aC	0.41aD	0.43aD	0.39aD
10	0.26aE	0.36bD	0.44aC	0.51aB	0.60bA	0.43aC	0.45aC	0.43aC	0.38aD	0.39aD	0.36aD
20	0.26aD	0.36bC	0.47aB	0.56aA	0.57bA	0.42aB	0.44aB	0.43aB	0.34aC	0.41aB	0.34aC
30	0.22aD	0.38bC	0.42aC	0.52aA	0.45cB	0.39aC	0.41aC	0.42aC	0.39aC	0.35aC	0.36aC
40	0.27aD	0.46aB	0.48aB	0.57aA	0.56bA	0.46aB	0.47aB	0.42aC	0.38aC	0.38aC	0.36aC
Al* (mg kg <sup>-1</sup> )											
0	676aG	1374bF	2503aE	2377dE	5868cC	2767bE	4112aD	5501cC	4860bD	13885bB	18382aA
10	585aI	1355bH	2623aG	2946cG	7069bD	3659aF	4582aE	8633bC	5156bE	17409aB	20652aA
20	570aH	1533bG	2778aE	3474bE	6564cD	2948bF	3825aE	8603bC	5474bD	11742cB	21538aA
30	595aI	1369bH	2967aG	4722aE	11783aC	3274aG	3934aF	7856bC	7013aD	14611bB	19798aA
40	561aI	1834aH	2473aG	2911cF	8108bD	3847aE	3854aE	11823aC	7024aD	17275aB	21976aA
Fe* (mg kg <sup>-1</sup> )											
0	267aH	714aG	1531aE	1203bF	4091aC	1690aE	2512aD	4526bC	2668bD	7191aB	9176aA
10	284aF	807aE	1776aD	2020aD	4804aB	2309aD	2983aC	5738bB	2816bC	8770aA	10664aA
20	278aE	827aD	1773aC	2102aC	4212aB	2041aC	2490aC	5020bB	2568aC	5582a	10424a
30	200aG	890aF	2093aE	2370aE	6318aC	2040aE	2389aE	4871bC	3721aD	7374aB	9992aA
40	244aH	1055aG	1733aF	2513aE	5403aC	2401aE	2676aE	7242aB	3798aD	7605aB	10455aA

TABELA 7. TEORES MÉDIOS DE Ca, Mg, K, P, Al, Fe, Mn, Zn E Cu NOS HORIZONTES DA LITEIRA: LITER NOVO (LN), LITER VELHO (LV); E NAS FRAÇÕES FINA, MÉDIA E GROSSA DOS SUBHORIZONTES PRIMEIRO E SEGUNDO FRAGMENTADO (FR E FM), E LITER HUMIFICADO (H); EM PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg Ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL. (conclusão)

Dose (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Frações da liteira										
	Ln	Lv	Fr grossa	Fr média	Fr fina	Fm grossa	Fm média	Fm fina	H grossa	H média	H fina
						Mn** (mg kg <sup>-1</sup> )					
0	177.35aB	206.84aA	163.92aB	160.36aB	148.83aB	55.20bC	65.49aC	46.13aC	46.29aC	38.30bD	27.85dD
10	154.49aA	161.57bA	144.05aA	168.04aA	147.02aA	49.86bB	53.50aB	51.08aB	39.76aB	54.96bB	42.88cB
20	133.87bA	136.23bA	138.30aA	166.44aA	126.70aA	51.71bB	49.78aB	48.89aB	50.84aB	52.39bB	49.10cB
30	135.37bA	144.51bA	125.34aA	158.60aA	97.20bB	54.97bC	48.09aC	51.11aC	53.40aC	57.43bC	65.50bC
40	123.57bB	169.99bA	137.36aB	173.25aA	126.20aB	89.50aC	72.55aD	61.71aD	68.39aD	81.95aC	95.11aC
						Zn*(mg kg <sup>-1</sup> )					
0	10.77aC	11.91aB	14.61aB	14.35aB	80.75aA	7.42aC	12.41aB	14.77aB	9.97bC	11.05dC	15.19bB
10	10.19aB	11.32aB	15.45aB	16.86aB	50.05bB	11.53aB	12.00aB	13.97aB	13.23bA	51.02cA	36.07aA
20	9.98aC	14.09aB	15.58aC	17.87aB	37.31bA	8.94aC	9.06aC	15.58aB	16.17bB	29.00cA	39.42aA
30	9.48aC	15.14aB	15.14aB	18.05aB	37.59bA	8.91aC	9.95aC	20.26aB	18.65aB	72.65bA	45.19aA
40	10.94aD	16.54aC	15.29aC	18.43aC	55.71bB	10.50aD	10.30aD	22.03aC	21.42aC	88.74aA	61.58aB
						Cu* (mg kg <sup>-1</sup> )					
0	2.32aC	3.40aB	3.95aB	3.69aB	5.93aA	3.87aB	3.08aB	4.04aB	3.79bB	4.88dA	5.88bA
10	2.19aE	3.23aD	3.76aD	4.42aC	6.05aB	3.79aD	3.28aD	4.58aC	4.23bC	7.61cA	8.73bA
20	2.32aE	3.18aD	4.01aD	3.99aD	5.30aC	3.43aD	2.95aE	5.25aC	5.86aC	8.06cB	11.32aA
30	1.73aE	3.26aD	3.96aC	4.17aC	5.86aB	3.36aD	3.07aD	4.89aB	5.32aB	10.49bA	10.21bA
40	2.10aD	3.93aC	3.92aC	4.15aC	5.69aB	3.74aC	3.17aC	5.31aB	6.23aB	14.42aA	13.08aA

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si de acordo com teste SK a 5% de probabilidade. Ln Liter novo. Lv Liter velho. Fr grossa, fração maior que 2 mm do subhorizonte primeiro fragmentado da liteira. Fr média, fração entre 1 e 2 mm do subhorizonte primeiro fragmentado da liteira. Fr fina, fração menor que 1mm do subhorizonte primeiro fragmentado da liteira. Fm grossa, fração maior que 2 mm do subhorizonte segundo fragmentado da liteira. Fm média, fração entre 1 e 2 mm do subhorizonte segundo fragmentado da liteira. Fm fina, fração menor que 1mm do subhorizonte segundo fragmentado da liteira. H grossa, fração maior que 2 mm do horizonte humificado da liteira. H média, fração entre 1 e 2 mm do horizonte humificado da liteira. H fina, fração menor que 1mm do horizonte humificado da liteira. \*Para a realização dos testes estatísticos os dados transformados utilizando log (X). \*\*Para a realização dos testes estatísticos os dados transformados utilizando raiz quadrada (X).

TABELA 8. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO RELATIVAS AS DIFERENTES FRAÇÕES DA LITEIRA ACUMULADAS SOBRE O SOLO DE CULTIVADO COM P. TAEDA SOB DIFERENTES DOSES DE RAPR NO MUNICÍPIO DE RIO NEGRINHO.

Fração da Liteira	Variável	Equação de Regressão	R2
Fr média	Massa	sem ajuste	-
H média		$y = 2827.7 + 201.42 x - 3.6646 x^2$	0.85*
H < 1		$y = 3784.6 + 61.155 x$	0.55*
Fr média	%Cinza	$y = 6.5218 + 0.1265x - 0.0012 x^2$	0.82**
Fr fina		sem ajuste	-
Fr grossa		$y = 5.5642 + 0.0816 x - 0.0015 x^2$	0.77*
Fm média		sem ajuste	-
Fm fina		sem ajuste	-
Fm grossa		sem ajuste	-
H média		sem ajuste	-
H grossa		$y = 9.4642 + 0.0717x + 0.0054 x^2$	0.97*
H grossa		$y = 0.6136 + 0.324 x - 0.0037 x^2$	0.99**
H média		$y = - 8.7909 + 7.2733 x$	0.83**
H fina	Ca	$y = - 3.4508 + 3.602 x$	0.98**
H grossa	Mg	sem ajuste	-
H média		sem ajuste	-
H fina		$y = 0.7801 - 0.0827x + 0.0258 x^2$	0.98**
Lv	P	$y = 0.45 - 0.0804 x + 0.0165 x^2$	0.98**
Fr<1		$y = 0.7237 - 0.0145 x + 0.0002 x^2$	0.84**
Lv	Al	sem ajuste	-
Fr média		sem ajuste	-
Fr fina		sem ajuste	-
Fm grossa		sem ajuste	-
Fm fina		sem ajuste	-
H grossa		$y = 4.6681 + 0.0619 x$	0.89**
H média		sem ajuste	-
Ln	Mn	$y = 205.06 - 31.631x + 3.1604x^2$	0.96**
Lv		$y = 278.62 - 84.127x + 12.508x^2$	0.99**
Fr média		sem ajuste	-
Fm grossa		$y = 78.706 - 27.406 x + 5.7964 x^2$	0.93**
H fina		$y = 8.9439 + 15.715 x$	0.93**
Fr fina		$y = 126.38 - 53.682x + 7.904 x^2$	0.99*
H grossa		$y = 6.6745 + 3.4477x - 0.1025x^2$	0.99*
H média	Zn	$y = - 2.6101 + 17.7 x$	0.78**
H fina		$y = 8.9228 + 10.189 x$	0.92**
Ln		sem ajuste	-
Lv	Cu	$y = 3.9665 - 0.6559 x + 0.1237 x^2$	0.93**
H grossa		$y = 3.2946 + 0.5977 x$	0.81**
H fina		$y = 2.5046 + 2.1967x$	0.94**
H média		$y = 5.0807 + 1.5878x$	0.85**



FIGURA 2. COMPONENTE DE ANÁLISES PRINCIPAIS: GRÁFICO DE CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS DE TEOR DE CINZAS E ELEMENTOS NA LITEIRA NO TRATAMENTO CONTROLE E NA DOSE DE 40 Mg Ha<sup>-1</sup> DE RAPR E OS DOIS COMPONENTES PRINCIPAIS EM PLANTIO DE DE *P. TAEDA*.

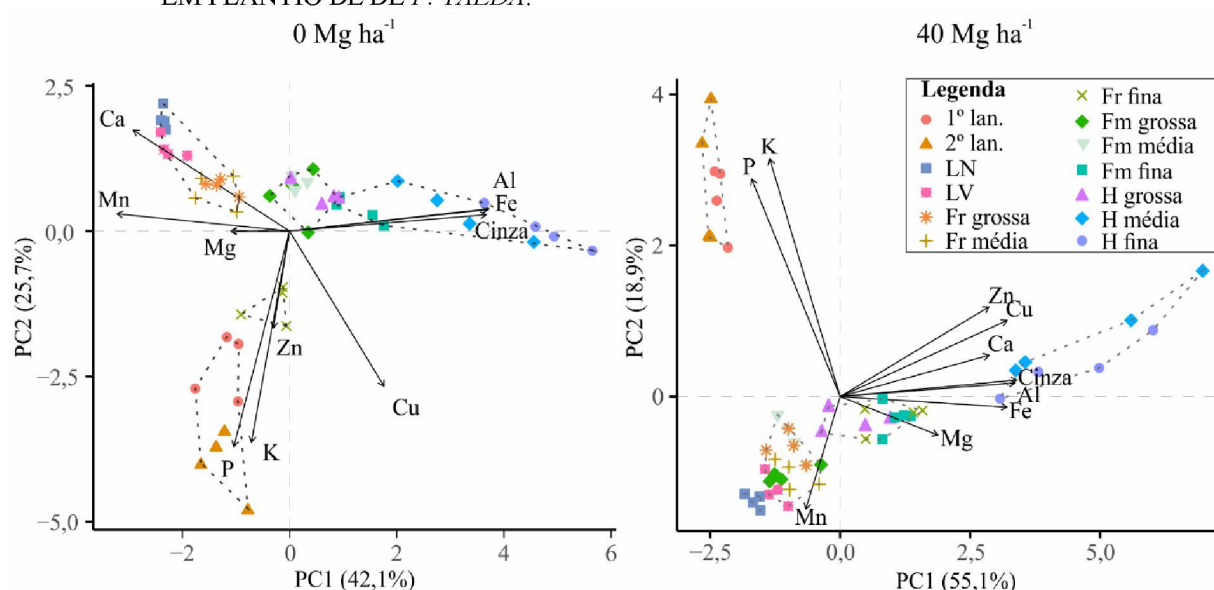


TABELA 9. COEFICIENTE DOS VALORES ASSOCIADOS AOS EIXOS DA PCA REPRESENTANDO A DOSE COM 0 Mg Ha<sup>-1</sup> E A DOSE DE 40 Mg Ha<sup>-1</sup>.

Variável	0 Mg ha <sup>-1</sup>		40 Mg ha <sup>-1</sup>	
	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 1	Eixo 2
cinza	0.45		0.41	
Al	0.46		0.41	
Ca	-0.36	0.27	0.35	0.11
Cu	0.22	-0.42	0.39	0.21
Fe	0.46		0.39	
K		-0.57	-0.16	0.65
Mg	-0.13		0.23	-0.11
Mn	-0.40			-0.31
P	-0.13	-0.59	-0.21	0.59
Zn		-0.26	0.35	0.25

### 3.1.6 Efeito das doses de RAPR na massa e comprimento de raízes

As raízes estão presentes no subhorizonte primeiro fragmentado em pequena quantidade em massa e comprimento (TABELA 10). Ao se analisar a relação massa comprimento, elas são semelhantes às do subhorizonte Fr, porém quimicamente elas se distinguem das raízes presentes nas demais divisões. As raízes tendem a se concentrar no horizonte humificado (TABELA 10), exceto para o tratamento controle, no qual a concentração de raízes no subhorizonte Fm é 2,7 vezes maior que no horizonte H. Isso mostra que a aplicação do resíduo promoveu mudança na

distribuição das raízes. A aplicação do resíduo proporcionou alteração no comprimento médio, na massa das raízes e na relação comprimento massa (TABELA 10) no horizonte H. No entanto, não foi possível ajustar uma equação de regressão para as variáveis. Independente da dose do RAPR houve aumento na quantidade de raízes no horizonte H. Neste horizonte a aplicação do RAPR promoveu aumentos que variaram do dobro (20 Mg.ha<sup>-1</sup>) até mais de oito vezes (30 Mg.ha<sup>-1</sup>) o valor de massa e comprimento de raízes em comparação com a testemunha (TABELA 10). Ainda no horizonte H as raízes são mais grossas, o que pode ser observado na unidade de comprimento por massa de raízes, onde a mesma reduziu o valor da relação.

TABELA 10. COMPRIMENTO, MASSA E RELAÇÃO DE COMPRIMENTO SOBRE MASSA (C.M) DAS RAÍZES PRESENTES NOS SUBHORIZONTES PRIMEIRO E SEGUNDO FRAGMENTADO (FR E FM), E LITER HUMIFICADO (H); EM PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 MG HA<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

Dose (Mg.ha <sup>-1</sup> )	Comprimento* (mil km ha <sup>-1</sup> )			Massa* (kg ha <sup>-1</sup> )			C. M (m.g <sup>-1</sup> )		
	Fr	Fm	H	Fr	Fm	H	Fr	Fm	H
0	1,1aA	28,3aA	11,5bA	21,0aC	588,3aA	282,4bB	52,42aA	52,37aA	58,38aA
10	1,1aB	14,2aB	67,6aA	19,4aC	241,8aB	2061,3aA	52,31aA	56,76aA	48,74aA
20	1,1aA	16,8aA	25,1bA	17,9aB	294,7aA	786,7bA	59,52aA	56,68aA	52,89aA
30	1,3aB	15,3aB	93,9aA	25,3aC	299,3aB	2474,7aA	50,93aA	40,10aB	35,59bB
40	0,8aB	13,8aB	49,6aA	14,6aC	263,4aB	1618,7aA	33,83bA	39,22aA	31,00bA

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si para cada variável de acordo com teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Fr horizonte primeiro fragmentado. Fm horizonte segundo fragmentado. H horizonte humificado. \*Para a realização dos testes estatísticos os dados transformados utilizando log (X).

### 3.1.7 Efeito das doses de RAPR na composição química das raízes de pinus

O comportamento natural das raízes nos diferentes horizontes se divide conforme o grupo de elementos. Em um primeiro grupo estão presentes os elementos K e Zn, estes tendem a diminuir do horizonte primeiro fracionado até o humificado. Em outro grupo estão Ca, Mg, P, Mn e Cu. Estes tendem a ser maiores no primeiro fracionado, já no segundo fracionado e o humificado são semelhantes. Por último o Al, em que na ausência da aplicação do resíduo ocorre concentração do teor do primeiro fragmentado até o humificado. Embora a relação comprimentos pela massa seja parecida nos horizontes Fr e Fm, quimicamente as raízes do Fr são distintas.

TABELA 11. TEORES MÉDIOS DE Ca, Mg, K, P, Al, Fe, Mn, Zn, Cu E RELAÇÃO Ca/Al NAS RAÍZES PRESENTES NOS SUBHORIZONTES PRIMEIRO E SEGUNDO FRAGMENTADO (FR E FM), E LITER HUMIFICADO (H) DA LITEIRA EM PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg Ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

Camada	-----Dose (Mg.ha <sup>-1</sup> )-----					Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
	0	10	20	30	40		
Ca* (g kg <sup>-1</sup> )							
Fr	15,3aA	31,2aA	27,9aA	38,6aA	25,5bB	y= 15.88 + 1.53x - 0.03x <sup>2</sup>	0.74**
Fm	6,1bB	15,5cA	14,7bA	16,2cA	15,7cA	y= - 1.11 + 9.51x - 1.25x <sup>2</sup>	0.85**
H	4,9bC	21,5bB	24,2aB	25,7bB	38,9aA	y= 1.37 + 7.21x	0.88**
Mg (g kg <sup>-1</sup> )							
Fr	8,7aC	9,1aC	9,5aB	8,6aC	10,4aA	sem ajuste	-
Fm	4,3bA	3,9bA	3,5bA	3,4bA	3,7bA	-	0.98*
H	3,8bA	3,8bA	3,3bB	3,2bB	2,8cB	y= 4.19 - 0.27x	0.93**
K (g kg <sup>-1</sup> )							
Fr	25,0aB	28,7aA	27,4aA	23,0aB	29,7aA	sem ajuste	-
Fm	11,5bA	7,6bB	8,9bB	9,7bB	8,2bB	sem ajuste	-
H	7,8cA	9,0bA	9,8bA	9,8bA	7,6bA	-	-
P (g kg <sup>-1</sup> )							
Fr	7,6aA	7,6aA	7,9aA	6,2aB	8,2aA	sem ajuste	-
Fm	3,0bA	2,7bA	2,8bA	2,8bA	2,bA	-	-
H	2,7bA	2,8bA	2,6bA	2,3bA	2,2bA	-	-
Al (mg kg <sup>-1</sup> )							
Fr	11914cA	8919cA	8432cA	10995cA	12257cA	sem ajuste	-
Fm	17344bA	19577bA	17743bA	16142bA	19558bA	-	-
H	26413aB	33158aA	33840aA	29898aB	28406aB	-	-
Ca/Al							
Fr	1,32aA	4,10aA	3,39aA	3,57aA	2,17aA	-	-
Fm	0,36aA	0,80aA	0,84aA	1,01aA	0,81aA	-	-
H	0,19aA	0,67aA	0,72aA	0,89aA	1,36aA	-	-
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )							
Fr	7974aA	6154aB	6493aB	8046aA	5510aB	sem ajuste	-
Fm	3439cB	5404aA	4349bB	3729cb	4259aB	sem ajuste	-
H	5130bA	5600aA	6219aA	5458bA	5291aA	-	-
Mn* (mg kg <sup>-1</sup> )							
Fr	1308,5aA	938,3aA	958,9aA	1177,5aA	1118,6aA	-	-
Fm	361,1aA	292,0aA	229,8aA	237,6aA	350,5aA	-	-
H	286,7aA	189,8aA	165,8aA	238,1aA	249,5aA	-	-
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )							
Fr	252,9aC	265,1aC	444,7aA	358,9aB	389,9aB	sem ajuste	-
Fm	160,1bA	166,8bA	73,1bB	106,5bB	151,2bA	sem ajuste	-
H	76,7cA	106,7cA	92,0bA	82,6bA	96,3cA	-	-
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )							
Fr	47,7aA	42,4aA	47,1aA	53,1aA	49,9aA	-	-
Fm	17,2aA	17,0aA	15,9aA	17,2aA	20,0aA	-	-
H	18,5aA	19,5aA	22,1aA	20,1aA	25,0aA	-	-

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si de acordo com teste SK a 5% de probabilidade. Fr horizonte primeiro fragmentado. Fm horizonte segundo fragmentado. H horizonte humificado. \*Para a realização dos testes estatísticos os dados transformados utilizando log (X). – Não calculada Anova p>0,05.

A aplicação do RAPR alterou a composição química das raízes do pinus (TABELA 11), exceto para Mn e Cu. Nos horizontes primeiro e segundo fragmentado, houve variação com a aplicação do resíduo para os elementos K, Fe e Zn. Já o elemento P variou com a aplicação do RAPR somente no horizonte primeiro fragmentado. Enquanto o macronutriente Mg sofreu alteração nos seus teores com a aplicação do resíduo nos horizontes primeiro fragmentado e humificado, com ajuste de equação de regressão somente para o último (TABELA 11). Para o elemento Al, a aplicação do RAPR promoveu alteração nos teores no horizonte humificado, porém não foi possível ajustar uma equação de regressão para descrever seu comportamento. O macronutriente Ca foi alterado pela aplicação do resíduo em todos os horizontes, com respostas lineares no horizonte H (TABELA 11). Nota-se que ocorre uma grande elevação nos teores de Ca da testemunha para as demais doses (TABELA 11). Comportamento que difere do observado para a acícula, solo e liter.

#### 3.1.8 Efeito das doses de RAPR nos parâmetros de solo

O Ca disponível foi sem dúvida o que apresentou maiores variações associadas ao uso de RAPR. No ano de 2008, o uso de RAPR proporcionou acréscimo quadrático de Ca na camada de camada de 0-5 cm (TABELA 12). Já, em 2012 e 2017 os acréscimos de Ca foi estendido para a camada de 0-5 e 5-10 cm, sendo que os aumentos diminuíram em profundidade. Contudo, os acréscimos lineares (TABELA 12) observados em 2017 tendem a diminuir em relação a 2012 (FIGURA 3), indicação de decréscimo na resposta, ocorrido provavelmente pelo consumo de Ca. Os aumentos observados na primeira camada foram cerca de 3 e 4 vezes maiores da camada de 0-5 cm para 5-10 cm e 5-10 cm para 10-20 cm, sugerindo uma baixa mobilidade do Ca. O grande acréscimo do Ca no solo confirma o efeito na planta.

A ação alcalina do resíduo foi confirmada com aumento do pH linear na camada de 0-5 cm para o ano de 2008. Nas camadas 0-5 e 5-10 cm nos anos de 2012 e 2017, com ajustes quadráticos para o ano de 2012 e lineares para 2017 (TABELA 12). A maior dose do RAPR manteve o pH estável ao longo dos anos nas camadas de 0-5 e 5-10 cm (FIGURA 3). Os efeitos no solo foram percebidos também para o Al trocável. Este nos anos de 2012 e 2017 teve seus

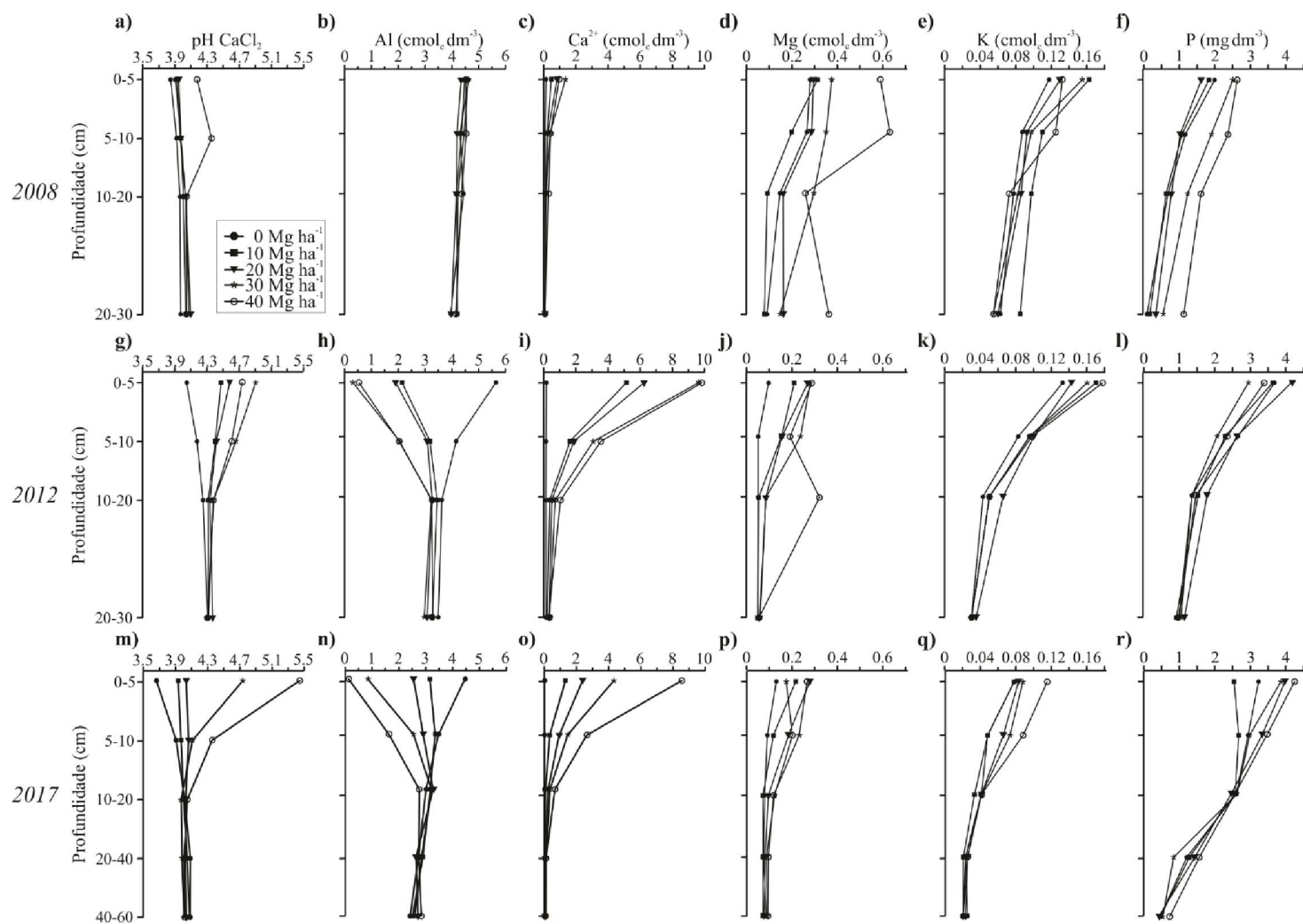
teores médios diminuídos nas camadas de 0-5 e 5-10 cm (FIGURA 3), o comportamento ao longo dos anos em relação a estabilidade de teores foi similar porém inverso ao do pH.

A última avaliação realizada em 2017, uma década após a aplicação do RAPR demonstrou interação entre dose e profundidades para o Mg, o teor deste elemento na camada de 0-5 e 5-10 cm com a maior dose do RAPR foi o dobro em relação a testemunha.

TABELA 12. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO RELATIVAS ALTERAÇÕES NO pH, Ca, Mg E Al NOS ANOS DE 2008, 2012 E 2017 EM SOLO SOB PLANTIO DE *P. TAEDA* CULTIVADO SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40 Mg Ha<sup>-1</sup> DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.

Ano	Variável	Camada	Equação de Regressão	R2
2008	pH	0-5 cm	y= 3.8235 + 0.0068 x	0.72*
		5-10 cm	y= 4.11 - 0.1969x + 0.0471 x <sup>2</sup>	0.82*
	Ca	0-5 cm	y= - 0.623 + 0.7953 x - 0.0907 x <sup>2</sup>	0.87**
2012	pH	0-5 cm	y= 3.8458 + 0.0457 x - 0.0007 x <sup>2</sup>	0.94**
		5-10 cm	y= 3.9784 + 0.0206 x - 0.0002 x <sup>2</sup>	0.90**
	Ca	0-5 cm	y= 5.382 - 0.2944 x + 0.0044 x <sup>2</sup>	0.97**
		5-10 cm	y= 3.977 - 0.0538 x	0.95**
	Al	0-5 cm	y= 3.977 - 0.0538 x	0.91*
2017	pH	0-5 cm	y = 3.4885 + 0.0437 x	0.91**
		5-10 cm	y = 3.873 + 0.0104 x	0.91**
	Ca	0-5 cm	y = - 0.704 + 0.2006 x	0.91**
		5-10 cm	y = - 0.2065 + 0.0638 x	0.94**
	Mg	0-5 cm	y = 0.1665 + 0.0023 x	0.34ns
		5-10 cm	y = 0.0915 + 0.0036 x	0.96**
	Al	0-5 cm	y = 5.552 - 1.1371x + 0.0064x <sup>2</sup>	0.99**
		5-10 cm	y = 3.668 - 0.0452 x	0.92**

FIGURA 3. TEORES MÉDIOS DE CA, MG, K, P, AL E PH EM  $\text{CaCl}_2$  NO SOLO EM PROFUNDIDADE NOS ANOS DE 2007, 2012 E 2017 EM PLANTIO DE DE P. TAEDA CULTIVADAS SOB DIFERENTES DOSES DE RESÍDUO ALCALINO DE PAPEL RECICLADO (0, 10, 20, 30 E 40  $\text{MG HA}^{-1}$  DE RAPR), NO MUNICÍPIO RIO NEGRINHO, SANTA CATARINA, NO SUL DO BRASIL.



## 3.2 DISCUSSÃO

### 3.2.1 Dados de crescimento

Os incrementos médios anuais (IMA) do presente trabalho podem ser considerados altos, com valores acima de  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Valores de IMA acima de  $32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  são considerados altos (MORO et al., 2014; SANQUETTA et al., 2018) e valores maior que  $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  são considerados muito alto (PINTO JR. et al., 2013). Tais fatos sugerem excelente condição climática, com precipitação entre  $1360 - 1670 \text{ mm ano}^{-1}$  uniformemente distribuída no ano e temperatura entre  $15,5 - 17,0 \text{ }^\circ\text{C}$  (THOMÉ et al. 1999), e genética.

Porém mesmo com uma excelente produtividade, ocorreu aumento com uso de resíduo até a dose de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com incremento de 16% em relação a testemunha. Tal incremento pode estar associado ao Ca, uma vez que foi o único elemento com ampla variação no solo, liter e planta. Tal incremento foi muito inferior aos 122 % observado por Rodriguez et al., (2018), em condição de solo de baixa fertilidade e com valores muito baixos de IMA. A ausência de resposta a partir de  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$ , pode estar associado a elevação do pH e consequente diminuição da população de micorrizas (LEHTO, 1994; WINAGRASKI *et al.*, 2014), uma vez que não houve variação que indique desequilíbrio nutricional. Sabe-se que a simbiose com micorrizas contribui grandemente para o suprimento de nutrientes no pinus, e esta tem se mostrado muito sensível as alterações de pH (LEHTO, 1994; WINAGRASKI *et al.*, 2014).

### 3.2.2 Efeito das doses de RAPR na composição química das acículas de pinus

Dentre os elementos avaliados, o Ca foi o mais afetado, tanto em termo de magnitude de aumento quanto na frequência. Os aumentos podem ser justificados dado a grande quantidade de RAPR adicionada, baixa disponibilidade de Ca no solo e baixa concentração no tecido da acícula. A baixa concentração de Ca nas acículas da planta da testemunha no ano de 2018, que ficou abaixo de  $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ , estabelecida por Albaugh et al. (2010) como concentração ideal confirma a baixa disponibilidade e potencializa a possibilidade de resposta a aplicação do mesmo. Ainda, as concentrações obtidas ficaram abaixo do observado para acícula de plantas crescidas sobre material de origem basáltico, rico em Ca (VIERA; SCHUMACHER, 2009).

A concentração de Ca pode ser influenciada pela idade da acícula e da planta, época do ano e condições ambientais locais. Análise de acículas novas de *P. radiata* na Nova Zelândia (ASKEW, 1937) indicaram que árvores mais velhas tem a concentração de Ca reduzida quando comparadas com árvores mais jovens, resultados semelhantes foram obtidos no presente trabalho. Esse decréscimo geral nos teores de Ca das acículas de 2018, pode estar relacionado a sua retenção nas estruturas da planta, como se trata de árvores de 13 anos e relativamente altas, o transporte de Ca até acículas é dificultado como comprovado no trabalho de Augusto et al. (2011).

A baixa redistribuição do Ca foi confirmada com maiores concentrações no segundo lançamento (VIERA; SCHUMACHER, 2009). Contudo, o efeito no mesmo ano de aplicação não era esperado em função de sua baixa mobilidade no xilema (AUGUSTO et al. 2011). Os mesmos autores verificaram que a injeção de Ca marcado no xilema, só resultou em pequena mudança na concentração foliar no segundo ano. A baixa idade da planta e a alta dose de Ca adicionada pode ser o motivo da mudança já no primeiro ano. O fator quantidade aplicada de RAPR acelerou a resposta da planta ao Ca, efeito em curto período de tempo também foi reportado por Batista et al (2015).

A elevação de Ca na acícula não resultou em mudanças nas concentrações de Mg e K, como resultado da interação antagônica comumente observada entre os mesmos (MARSCHNER, 2012). Tal fato é relevante a medida que os teores de Mg e K estão próximos aos níveis considerados limitantes  $0,8 \text{ g kg}^{-1}$  (Mg) e  $4,0 \text{ g kg}^{-1}$  (K), respectivamente indicado por (SYPERT, 2006; ALBAUGH et al., 2010). Contudo, houve aumento na disponibilidade de Mg o que pode estar compensando um provável efeito da interação. Nas duas avaliações e lançamentos os teores de K estão acima dos encontrados em área plantada em solo de origem basáltica, em contrapartida os teores de Mg estão abaixo (VIERA; SCHUMACHER, 2009).

O resíduo não atuou como fonte de P ou resultou em mudanças que propiciassem a maior absorção de P pela planta, mesmo estando as concentrações nas acículas em 2008 abaixo do que é considerado como adequado (ALBAUGH et al., 2010). E em 2018, ligeiramente superior aos níveis ótimos de  $1 \text{ g kg}^{-1}$  (ALBAUGH et al., 2010). Houve interação das maiores doses diminuindo a quantidade de P no segundo lançamento de 2018. Já as concentrações de Zn estão acima do nível adequado (ALBAUGH et al., 2010). Nas duas avaliações e lançamentos os teores estão próximos dos encontrados em área plantada em solo de origem basáltica para o P (VIERA; SCHUMACHER, 2009; LONDERO et al., 2011; SIXEL et al., 2015) e Zn (



SCHUMACHER; VIERA; WITSCHORECK, 2008; VIERA; SCHUMACHER 2009, 2010; LONDERO et al. 2011). O decréscimo dos teores foliares de Zn e P e o aumento do Al com a aplicação de altas doses de resíduo pode estar ligado a um possível decréscimo de micorrizas associada a aumento do pH (LEHTO, 1994; WINAGRASKI et al., 2014). Pois estas, atuam como um mecanismo externo de resistência das plantas ao Al, diminuindo a absorção deste elemento pelas plantas (VAN BREEMEN et al., 2000; JANSSEN et al., 2004).

O aumento em relação a 2008 nos teores de P, K, Zn e Cu pode estar ligado a um maior volume de solo explorado e pela manutenção via ciclagem (VIERA; SCHUMACHER, 2009). Para Cu e Zn, vale lembrar que o RAPR é uma fonte destes elementos.

### 3.2.3 Efeito das doses de RAPR na massa de liteira de pinus

A quantidade de liter observada neste estudo, de 35,8 a 42,1 Mg ha<sup>-1</sup>, estão dentro da faixa de 90,6 e 20,3 Mg.ha<sup>-1</sup>, obtida por Bizon (2005) para sítios de baixa fertilidade no norte do estado de PR. Mas, bem acima do valor de 10 Mg.ha<sup>-1</sup> constatado por Schumacher, Viera e Witschoreck (2008) em área no Rio Grande do Sul em solo formado sobre basalto.

A não alteração nos valores de massa total de liteira observados neste estudo sugere equilíbrio entre a taxa de adição, velocidade de decomposição e taxa de humificação. Em estudos de longo prazo, Jandl et al. (2003) observaram diminuição na quantidade de liteira de 76 Mg.ha<sup>-1</sup> para 24 Mg.ha<sup>-1</sup> com a fertilização e corretivo da acidez, justificado pelo grande incremento na atividade biológica. No sentido contrário, Wienand e Stock (1995) encontraram um aumento na taxa de deposição e diminuição na velocidade de decomposição ocasionando aumento na massa total de liter, passando de pouco menos de 10 Mg ha<sup>-1</sup> para próximo de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, proporcionada pela diminuição de N na acícula que caiu.

O efeito da fertilização pode ocorrer logo após a aplicação, como observado por Thirukkumaran e Parkinson (2002), desaparecendo no decorrer do tempo. A não alteração dos valores encontrados para Ln e Lv pela aplicação do RAPR sugerem a ausência de mudança na taxa de deposição visto que este representa o material mais novo, contrariando ao aumento observado por Wienand e Stock (1995). Os valores encontrados no presente estudo são semelhantes ao de outros plantios no sul do Brasil, que estão na ordem de 4,72 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (SCHUMACHER; VIERA; WITSCHORECK, 2008; VIERA; SCHUMACHER, 2010). Porém

existe uma grande variabilidade na taxa de deposição. Outros trabalhos na mesma região têm reportados valores entre 10 e 17 Mg ha<sup>-1</sup>ano (VELOSO et al., 2018), bem como, próximos de 7 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (PIOVESAN et al., 2011) e abaixo de 3 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (VIERA; SCHUMACHER, 2010).

De uma forma geral, o aumento das frações mais finas da liteira acompanhado da tendência de diminuição do material mais grosseiro (>2 mm) com a aplicação do RAPR, sugere um aumento na velocidade de decomposição e na taxa de humificação. A fertilização promove aumento na atividade biológica (JANDL et al., 2003), sendo que o alto teor de Ca ocasiona uma maior humificação pela produção de compostos mais condensados (CANELLAS et al., 2001; STEINER et al., 2004), atuando na proteção física dos compostos orgânicos (CARMEIS FILHO et al., 2017, CARMEIS FILHO et al., 2018). Na área de estudo é provável que os mecanismos se complementem.

### 3.2.4 Efeito das doses de RAPR na quantidade de cinzas da acícula e da liteira de Pinus

A diminuição dos teores de cinza nas acículas do primeiro lançamento até a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup> mostra um provável efeito de diluição dado pelo aumento no crescimento.

O teor de cinzas do horizonte Ln é similar ao das acículas mostrando que ambos apresentam concentração total similar. Este teor quase que dobra no horizonte Lv, isso se deve provavelmente a rápida contaminação com solo, evidenciados pelo aumento de Al e Fe que serão discutidos a seguir. Visualmente não haviam indícios de perda de massa nos horizontes Ln e Lv, a mudança percebida nestes horizontes se dá somente na coloração e resistência a tração do material. O aumento da porcentagem de cinzas se amplia com a idade do horizonte e se associa também com a diminuição da granulometria. Este aumento está possivelmente associado a bioturbação do solo, o que ocasiona o transporte de material a superfície da liteira. Esta contaminação pode ser facilmente justificada pela quantidade de 10 a 50 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> revolvida pelas minhocas e de 1 a 5 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> por cupins (WILKINSON; RICHARDS; HUMPHREYS, 2009). Além disso, foram observadas presença de orifícios de revolvimento da liteira, associadas a macrofauna predada por pequenos mamíferos, que possivelmente também contribuíram para o aumento no teor de cinzas. A aplicação do RAPR incrementou o percentual de cinzas na liteira, sugerindo possivelmente um aumento da atividade de macrofauna. Esse

aumento se deve a um aumento de Ca (LIMA et al., 2002) e diminuição da acidez ativa do solo (BUTT; BRIONES, 2017).

A maior porcentagem de cinzas encontrados nas frações mais finas (entre 1 e 2 mm e menor que 1 mm) dos horizontes fracionados e humificado, indica que o solo se associa fortemente ao material orgânico humificado (GOYA; FRANGI; TEA, 2008; JONCZAK, 2012), contribuindo para uma maior contaminação destes. Isto explica a falta de interação significativa na fração menor que 1mm do horizonte H a aplicação do resíduo. Nas partículas mais grosseiras (maior que 2 mm), essa associação é reduzida, visto que mesmo no horizonte H as partículas maiores apresentam teor de cinzas reduzidos, e guardam um aspecto similar ao material vegetal.

### 3.2.5 Efeito das doses de RAPR na composição química da liteira de pinus

Os aumentos na concentração de Ca principalmente na fração humificadas e finas, foram resultantes da existência do RAPR mesmo após 10 anos de aplicação. O aumento da concentração na acícula pelo uso de RAPR e CTC das frações mais finas como resultado do aumento do pH, permitindo maior retenção de Ca. Tal fato justifica a perda de Ca no tratamento controle em função grau de decomposição. A absorção de Ca das camadas humificadas também pode ter contribuído para decréscimo de Ca, no tratamento controle.

No sentido oposto ao Ca, o teor de Mn no Ln e Lv foi reduzido com aplicação do RAPR dado provavelmente ao aumento do pH, embora isso não tenha ficado evidente nas acículas de primeiro e segundo lançamento. Porém, houve rápida mobilização do Mn com a decomposição do material, corroborando com Berg et al. (2013), que afirma que o Mn é altamente móvel na liteira do pinus comparativamente a outros tecidos foliares de plantas dado a elevada acidez das acículas. Ainda, a baixa energia de adsorção de Mn nos ácidos húmicos principalmente em condição ácida (KERNDORFF; SCHNITZER, 1980) são possíveis causas relacionadas a grande decréscimo com avanço da idade do liter. Contudo, a adição de material alcalino diminui a perda de Mn com aumento da quantidade de cargas (BRANDTBERG; SIMONSSON, 2003; PEHLIVAN; ARSLAN, 2006) e a complexão de Mn no material humificado (SIMS, 1986), mas não o suficiente para manter a concentração inicial. Ainda, a existência de outros elementos tais como Zn, Cu, Al e Fe que são adsorvidos com maior grau de energia que o Mn

(KERNDORFF; SCHNITZER, 1980), competindo pelos mesmos pontos de adsorção potencializando a perda de Mn, principalmente em condição ácida.

A manutenção e a concentração de Cu e Zn nas frações finas e mais velhas advém da contaminação do próprio resíduo. Além disso, confirma o alto grau de energia envolvido destes com os compostos orgânicos humificados (KERNDORFF; SCHNITZER, 1980). As variações na concentração nas acículas foram pequenas para gerar efeitos nas frações Ln e Lv. Maiores aumentos do Zn em relação ao Cu podem estar relacionados, a valores 5 vezes maiores de Zn comparado com o Cu no RAPR. Assim, a concentração de Zn indica que as frações humificadas atuam como reservatório deste elemento ao mesmo tempo sugere uma forte retenção o que certamente dificulta a disponibilização do mesmo as plantas.

Os grandes acréscimos nos teores de Al e Fe, certamente estão associados primariamente a fração solo nos resíduos orgânicos, o que pode ser visto pela correlação existente entre a quantidade de cinzas e o teor de Al e Fe na dose 0 do RAPR. Como discutido isso ocorre principalmente pela bioturbação. Foi observado durante a amostragem de solo e liter a presença de elevada atividade de animais, com presença de furo para procurar insetos e larvas, o que certamente determina uma alta movimentação de solo. Outros três processos também podem estar ocorrendo simultaneamente, sendo estes: concentração pela massa orgânica, enriquecimento via soluto do solo e deposição por exsudação pela micorriza. Primeiro, por serem retidos com alto grau de energia (KERNDORFF; SCHNITZER, 1980), é provável que haja concentração dado pelo processo de diminuição da massa orgânica como observado para o Zn. Segundo, a solubilização do Al e Fe do solo, localizado na interface resíduo-solo, por ácidos orgânicos da decomposição da liteira seguido de fluxo ascendente do soluto para liter. Terceiro, transferência de elementos do solo para a serapilheira via micorizas ajuda a enriquecer os horizontes colonizados por raízes (BRANDTBERG; SIMONSSON, 2003). O Al acumula em materiais orgânicos, sendo reportada na literatura um aumento com a humificação de horizontes de liteira sobre o solo da floresta (YANAI et al., 2005; GOYA; FRANGI; TEA, 2008; JONCZAK, 2012) e acompanhando do Fe (BRANDTBERG; SIMONSSON, 2003).

### 3.2.6 Efeito das doses de RAPR na massa e comprimento de raízes

A colonização da liteira por raízes pode apresentar valores aparentemente altos. A massa de serapilheira sobre o solo de floresta *P. taeda* pode ser colonizada por pelo menos  $16.10^3 \text{ km ha}^{-1}$  de raízes que e em massa uma média de  $790 \text{ Kg ha}^{-1}$  (LOPES et al., 2010), encontramos valores acima do relatado principalmente no horizonte H com a aplicação do resíduo. Valores mais próximos a realidade do presente trabalho foram encontrados por Wang et al. (2016) em relação a massa de raízes no horizonte H. O incremento na quantidade (comprimento e massa) de raízes na liteira do horizonte H com a aplicação do RAPR contraria a ideia de que um aumento na fertilidade do sítio tenderia a diminuir a quantidade de raízes (GUERRA et al., 2005). Isso provavelmente ocorre pela pobreza do sítio em Ca, com o aumento do nutriente as raízes passaram a ter condições para crescimento. Esse aumento do Ca, ocasiona um grande aumento na relação Ca/Al no horizonte H, possibilitando assim um maior crescimento das raízes finas (VANGUELOVA et al., 2007).

Esta observação de que o aumento de determinado nutriente possibilita um aumento no crescimento radicular, também foi observado por Wang et al. (2016). Estes autores ao aplicarem K no solo em plantas com deficiência do nutriente encontraram um incremento no comprimento e quantidade de raízes na camada humificado do liter e no solo. É possível que em solos onde o teor do elemento acessível a cultura do Pinus seja limitante ao desenvolvimento de raízes, a fertilização com tal elemento promove um incremento em quantidades de raízes.

Existem diferenças químicas e ou físicas entre as raízes presentes nos diferentes horizontes e entre os subhorizontes. As raízes presentes nos subhorizontes Fr e Fm são mais finas que as encontradas no horizonte H. Embora as características físicas das raízes dos subhorizontes F sejam semelhantes, quimicamente elas são bem distintas, e discutiremos mais à frente estas diferenças.

Diversos trabalhos mostram que a aplicação de fertilizantes e corretivos de acidez promovem a diminuição na quantidade de raízes finas (LETHO, 1994; HELMISAARI; HALLBÄCKEN, 2000; BAKKER et al., 2009; WANG et al., 2016). Este fato também é observado no Fm no presente estudo, embora não exista diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ) devido ao alto coeficiente de variação que é comum para estudo com raízes (BENGOUGH et al., 2000). Essa diminuição pode estar ligada ao maior suprimento de Ca as raízes no horizonte H. Essa condição de maior colonização do Fm em detrimento do H no

tratamento controle é similar ao resultado observado por Wang et al. (2016). Estes verificaram que colonização de raízes é maior na fração menos decomposta. No entanto com a aplicação do resíduo as raízes parecem se moldar ao ambiente e as demandas internas da planta, colonizando mais a região com maior quantidade de nutrientes, principalmente Ca, visto que o solo é extremamente pobre em Ca.

### 3.2.7 Efeito das doses de RAPR na composição química das raízes de pinus

Como observado na acícula e na liteira, as raízes tiveram a concentração de Ca elevada com uso RAPR, sendo de 2 a 5 vezes mais que observada no controle. No entanto, ao contrário dos compartimentos avaliados anteriormente, o valor máximo já obtido na primeira dose do resíduo. Maiores concentrações observadas no subhorizonte Fr podem sugerir variação no tipo de raízes e na disponibilidade de Ca. Raízes no Fr tem maior superfície específica sendo provavelmente mais nova e fina. Já as raízes do horizonte H estão em contato direto com altos valores de Ca do horizonte. Contrapondo ao Ca, o uso de RAPR não alterou a concentração de Al nas raízes dentro dos subhorizontes Fr e Fm e sua concentração aumentou da Fr para H.

Mesmo não havendo alteração da concentração do Al nas raízes, há indicação de diminuição da toxidez de Al. Vanguelova et al. (2005) observou relação inversa entre a relação Ca/Al e toxidez de Al. A relação Ca/Al ficou abaixo de 0,2 para as raízes do horizonte H do tratamento controle. Esta é considerada crítica para espécie de *P. sylvestris* (VANGUELOVA et al., 2007).

O uso de RAPR resultou em aumentos de Zn encontradas no Fr e Fm assim como observado para as acículas de segundo lançamento de 2018. Não houve alteração para os demais elementos, como observado para acícula.

Maiores concentrações de Mg, K, P, Cu, Mn e Zn para raízes desenvolvidas no Fr em relação aos demais horizontes indicam provavelmente diferenças em termo de idade e anatomia.

### 3.2.8 Efeito das doses de RAPR nos parâmetros de solo

Confirma-se o efeito da interação dose x tempo x profundidade observado por estudos de longo prazo (BROWN et al., 1956; KOCH; ESTES, 1986; GASCHO; PARKER, 2001). Indica ainda efeito residual que ultrapassa o período de décadas observados pelos mesmos autores, quando aplicado em doses elevadas. A ausência de incorporação e contato com serapilheira, fez com o efeito do solo fosse pequeno no primeiro ano e restrito ao pH e Ca na camada de 0-5 cm. O efeito aumentou com tempo passando a atingir a camada de 5-10 cm e expandindo para o Al e Mg. Desta forma comprovasse o efeito do resíduo como corretivo e fonte de Ca (COSTA et al., 2009; DICKOW; VELHO; COSTA, 2016; MUSE; MITCHELL, 1995). A dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>, encontrada como ponto de máxima produtividade, manteve os níveis de pH abaixo de 4,5 ao longo do tempo, o que pode ter sido fundamental para evitar efeitos negativos aos fungos micorrízicos. Esta mesma dose mantém o teor de Ca em níveis médios (CQFS-RS/SC, 2004) mesmo após 10 anos da aplicação. A manutenção do nível de Ca após 5 anos, sugere uma liberação lenta do Ca do resíduo como comprova a análise da serapilheira e absorção pelo pinus, e que certamente permanecerá por longo período. O reflexo do efeito do resíduo ficou restrito ao Ca na acícula acompanhando ao observado para o solo.

## 4 CONCLUSÕES

O crescimento foi afetado com base na avaliação realizada aos 10 anos após aplicação, com valor máximo de crescimento com uso de 20 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduo. A nutrição da planta também foi afetada com grandes acréscimos para Ca nas acículas, sem que ocorresse interação antagônica com Mg e K. Também, acréscimo seguido de decréscimo para P e Zn, com aumento das doses foi observado o oposto para concentração foliar de Al. O uso da menor dose de resíduo já aumentou a quantidade de raízes na fração mais humificada da liteira. Novamente, a concentração de Ca sofreu grande acréscimo nas raízes sugerindo ser o fator principal nas alterações na planta.

O uso de resíduo não alterou a quantidade total de liteira mas, aumentou a fração humificada, sugerindo maior decomposição e manutenção da matéria orgânica. Aumento de Ca nas frações humificadas foram observadas, dado existência de frações do resíduo não solubilizado após 10 anos e manutenção nas frações humificadas. O resíduo alterou a dinâmica do Mn total, com a manutenção do mesmo no sistema. Acréscimos de Fe e Al acompanhando acréscimo na percentagem de cinza sugere uma alta participação do solo como contaminante do liter principalmente das frações mais finas e humificadas.

O efeito do resíduo alcalino sobre as propriedades químicas do solo foi lento com pequenas variações primeiro ano após aplicação. Efeito pronunciado foi observado na segunda avaliação aos 5 anos e diminuindo de 5 para os 10 anos. Sugerindo baixa reatividade inicial e alto efeito residual de mais de 10 anos para as maiores doses. Ainda, o efeito do resíduo em profundidade ampliou com o tempo e com dose aplicada, atingindo a camada de 5-10 cm. O uso de resíduo alcalino resultou em diminuição da acidez com aumento do pH e diminuição do Al, e grandes aumentos de Ca.



## REFERÊNCIAS

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. ABRAF, Brasília: 2013.
- ALBAUGH, J. M.; BLEVINS, L. H.; ALLEN, L.; ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; STAPE, J. L.; RUBILAR, R. A. Characterization of foliar macro and micronutrient concentrations and ratios in loblolly pine plantations in the southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v.34, n.2, p.53–64, 2010.
- ALMEIDA, H.C.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A.; MACABÔ JUNIOR, J. & ALMEIDA, D. Influência da adição de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose na lixiviação de cátions em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1775–1784, 2008.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; GERD SPAROVEK, G.; Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711–728, 2013.
- ASKEW, H. O. The chemical composition of *Pinus radiata* needles. **New Zealand Journal of Science Technology**, v.18, p.651-655, 1937.
- AUGUSTO, L.; ZELLER, B.; MIDWOOD, A. J.; SWANSTON, C.; DAMBRINE, E.; SCHNEIDER, A.; BOSCH, A. Two-year dynamics of foliage labelling in 8-year-old *Pinus pinaster* trees with  $^{15}\text{N}$ ,  $^{26}\text{Mg}$  and  $^{42}\text{Ca}$ -simulation of Ca transport in xylem using an upscaling approach. **Annals of Forest Science**, v.68, p.169–178, 2011.
- AUGUSTO, L.; ACHAT, D. L.; BAKKER, M. R.; BERNIER, F.; BERT, D.; DANJON, F.; KHLIFA, R.; MEREDIEU, C.; TRICHET, P. Biomass and nutrients in tree root systems – sustainable harvesting of an intensively managed *Pinus pinaster* (Ait.) planted forest. **GCB Bioenergy**, v.7, 231–243 p.231–243. 2015
- BABEL, U. **Moderprofile in waldern**. Ulmen: Stuttgart, 1972.
- BAKKER, M. R.; JOLICOEUR, E.; TRICHET, P.; AUGUSTO, L.; PLASSARD, C.; GUINBERTEAU, J. LOUSTAU, D. Adaptation of fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old *Pinus pinaster* stand. **Tree Physiology**, v.29, p.229–238, 2009.
- BAKKER, J. B.; LANGDON, O. G. *Pinus taeda* L., Loblolly Pine. In: BURNS, R. M., HONKALA, B. H. (eds.). **Silvics of North America**, Volume 1, Conifers. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service (Agriculture Handbook 654), p. 497-512. 1990.
- BALBINOT JR., A. A.; VEIGA, M.; FONSECA, J. A.; VOGT, G. A.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, E. R. O. aplicação de resíduo de reciclagem de papel em Cambissolo háplico e seu efeito no solo e no cultivo de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 336-344, 2014.

- BALBINOT JR., A. A.; VEIGA, M.; FONSECA, J. A.; VOGT, G. A.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, E. R. O. aplicação de resíduo de reciclagem de papel em Cambissolo háplico e seu efeito no solo e no cultivo de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 336-344, 2014.
- BATISTA, A. H.; MOTTA, A. C. V.; REISSMANN, C. B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I. L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilisation in Pinus taeda plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.37, n.1, p.117-125, Maringá, 2015.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. **Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. Boletim de Pesquisa Florestal. EMBRAPA**. n. 37, p. 99-106. Colombo, 1998.
- BENGOUGH, A.G.; CASTRIGNANA, A., PAGÈS, L.; VAN NOORDWIJK, M.; Sampling strategies, scaling, and statistics. In: Smit, A.L.; Bengough, A.G., Engels, C.; Van Noordwijk, M.; Pellerin, S.; Van de Geijn, S.C. (Eds.), **Root Methods: A Handbook**. Springer-Verlag, Berlin, p. 147–174, 2000.
- BERG, B. Decomposition patterns for foliar litter and a theory for influencing factors. **Soil Biology & Biochemistry**, v.78 222-232, 2014.
- BIZON J. M. C., Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de Pinus taeda L. usando um balanço de entrada e saída de nutrientes. **Dissertação de mestrado**. Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz. ESALQ/USP Piracicaba, 2005. 96p.
- BROWN, B. A., MUNSELL, R. I.; HOLT, R. F.; KING, A. V. Soil reactions at various depths as influenced by time since application and amount of limestone. **Soil Science Society of América Journal**, v. 20, p. 518- 522, 1956.
- BUTT, K. R.; BRIONES, M. J. I. Earthworms and mesofauna from an isolated, alkaline chemical waste site in Northwest England. **European Journal of Soil Biology**, v.78, p.43-49, 2017.
- BRANDTBERG, P.O.; SIMONSSON, M. Aluminum and Iron Chemistry in the O Horizon Changed by a Shift in Tree Species Composition. **Biogeochemistry**, v.63, p.207–228, 2003.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. Distribuição da matéria orgânica e características de ácidos húmicos em solos com adição de resíduos de origem urbana. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1529-1538, 2001.
- CARMEIS FILHO, A. C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; GUIMARÃES, T. M.; CALONEGO, J. C. Changes in soil physical properties and carbon protection mechanisms by surface application of lime in a tropical no-tillage system. **Soil Science Society of American Journal**, v.82, p;56–65. 2018.
- CARMEIS FILHO, A. C. A.; PENN, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. Agriculture, **Ecosystems and Environment**, v.241, p.11–23, 2017.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**. 2014.

COSTA, E. R. O.; RIZZI, N. E.; SILVA, H. D. da; MAEDA, S.; LAVARONI, O. J. Alterações químicas do solo após aplicação de biossólidos de estação de tratamento de efluentes de fábrica de papel reciclado. **Revista Floresta**, v. 39, n. 1, p. 1-10, 2009.

DICKOW, K. M. C.; VELHO, G. A. A.; COSTA, E. R. O. Incorporação de resíduo de estação de tratamento de efluentes de fábrica de papel reciclado ao solo. **7º fórum internacional de resíduos sólidos**. Porto Alegre, 2016.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D.; REISSMANN, C. B.; BELLOTE, A. F. J.; MARQUES, **Nutrição de pinus no sul do Brasil. Diagnóstico e prioridades de pesquisa**. Colombo: Embrapa Florestas, 23p. nov. 2001.

GASCHO, G.J., PARKER, M.B. Long-term liming effects on coastal plain soils and crops. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 1305-1315, 2001.

GUERRA, J.; JORGE GAYOSO, J.; JUAN SCHLATTER, J.; NESPOLO, R. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de Pinus radiata en Chile. **BOSQUE**, v.26, n.1, p.5-21, 2005.

GOYA, J.F.; FRANGI, J.L.; TEA, F. D. Decomposition and nutrient release from leaf litter in Eucalyptus grandis plantations on three different soils in Entre Ríos , Argentina  
Descomposición y mineralización de la hojarasca foliar en plantaciones de Eucalyptus grandis en tres tipos diferentes . **Ecology**, v.29:217–226, 2008.

GROBELAK, A.; PLACEK, A; GROSSER, A; SINGH, B. R.; ALMÅS, Á. R.; NAPORA, A.; KACPRZAK M. Effects of single sewage sludge application on soil phytoremediation. **Journal of Cleaner Production**. 2016;155:189–197.

HELMISAARI, H.S.; HALLBÄCKEN, L. Fine-root biomass and necromass in limed and fertilized Norway spruce (Picea abies (L.) Krast.) stands. **Forest Ecology and Management**, v.119, p.99–100, 2000.

INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de pedologia: guia prático de campo**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. Rio de Janeiro, v. 32, p. 1-8, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). **Indústria brasileira de árvores 2015**. IBA, Studio 113, 2015.

JANDL, R.; KOPESZKI, H.; BRUCKNER, A.; HAGER, H. Forest soil chemistry and mesofauna 20 years after an amelioration fertilization. **Restoration Ecology**, v.11, p.239–246, 2003.

- JANSEN, S.; WATANABE, T.; CARIS, P.; GEUTEN, K.; LENS, F.; PYCK, N.; SMETS, E. The distribution and phylogeny of aluminium accumulating plants in the Ericales. **Plant Biology**, v.6, p.498-505, 2004.
- JONCZAK, J. Effect of land use on the carbon and nitrogen forms in humic horizons of Stagnic Luvisols. **Leone Prace Badawcze**, v.73, p.143–151, 2012.
- JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. Safira: Sistema de Análise de Fibras e Raízes. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. São Carlos: EMBRAPA; p. 21. 2008.
- KERNDORFF, H.; SCHNITZER, M. Sorption of metals on humic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.44, p.1701–1708, 1980.
- KOCH, D.W., ESTES, G.O. Liming rate and method in relation to forage establishment-crop and soil responses. **Agronomy Journal**, v. 78, p. 567-571, 1986.
- LEHTO, T. Effects of soil pH and calcium on mycorrhizas of *Picea abies*. **Plant Soil**, v.163, p.69–75, 1994.
- KRISHNA M. P.; MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment, Joint Center on Global Change and Earth System Science of the University of Maryland and Beijing Normal University**, v.2, p.236–249, 2017.
- LIMA, H.N.; SCHAEFER, C.E.R.; MELLO, J.W.V.; GILKES, R.J.; KER, J.C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, v.110, p.1-17, 2002.
- LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; SZYMCZAK, D. A.; VIERA, M. Export and nutritional replacement in the first thinning of *Pinus taeda* L. in a second rotation area. **Ciência Florestal**, v.21, p.487–497, 2011.
- LOPES, V. G.; SCHUMACHER, M.V.; VIERA, F.N.; CALIL, M.; WITSCHORECK, R. Quantificação de raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L. e uma área de campo em Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, v.20, p.569–578, 2010.
- MAEDA, S.; GOMES, J. B.; BOGNOLA, I. A. Efeitos da aplicação de lodo celulósico e de cinza de caldeira em área de produção de *Pinus taeda*. **Comunicado técnico, 324**, Colombo, 28p., 2018.
- MAEDA, S.; SILVA, H. D.; COSTA, E. R. O.; BOGNOLA, I. A. Aplicação de resíduo alcalino de papel reciclado em plantios de pinus. **Comunicado Técnico 283**. Embrapa Florestas, Colombo, 2011.
- MARTINS, A. P. L.; REISSMANN, C. B. Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. **Revista Scientia Agraria**, 8: 1-17, 2007.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants** [Internet]. 3ª. Marschner P, organizador. Sch. Agric. Food Wine, Univ. Adelaide/Australia. London: Elsevier Ltd; 2012.

MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; CONSALTER, R.; REISSMANN, C. B. Nutrição e adubação da cultura de Pinus. In: **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. 1ed. Jaboticabal: FUNEP, 2014, v. 15, p. 383-426.

MORO, L.; GATIBONI, L. C.; SIMONETE, M. A.; CASSOL, P. C.; CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old Pinus taeda to NPK fertilization in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1181–1189, 2014.

MUSE, J. K.; MITCHELL, C. C. Paper Mill Boiler Ash and Lime By-Products as Soil Liming Materials. **Agronomy Journal**, v.87, p.432-438, 1995.

NGUYEN T. X. T.; AMYOT, M.; LABRECQUE, M. Differential effects of plant root systems on nickel, copper and silver bioavailability in contaminated soil. **Chemosphere**, v.168, p.131–138, 2017.

PEHLIVAN, E.; ARSLAN, G. Uptake of metal ions on humic acids. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v.28, p.1099–1112, 2006.

PÉRTILE, P.; ALBUQUERQUE, J. A.; GATIBONI, L. C.; COSTA, A.; WARMLING, M. I. Application of alkaline waste from pulp industry to acid soil with pine. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.939–950, 2012.

PINTO JR, J. E.; SANTOS, P. E. T.; AGUIAR, A. V.; KALIL FILHO, A. N.; PALUDZYSZYN FILHO, E.; STURION, J. A.; RESENDE, M. D. V.; SOUSA, V. A. Melhoramento genético de espécies arbóreas na Embrapa Florestas: uma visão histórica. **Documento 259**, 111p., 2013.

PIOVESAN G, SCHUMACHER MV, VIERA M, LOPES VG, WELTER C. Deposição de serapilheira em povoamento de Pinus. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.42, p.206–2011, 2012

PLATE, E. B. **Aplicação de lama de cal em solo de Floresta de Pinus taeda seus efeitos sobre a microbiota do solo e biodegradabilidade da serrapilheira**. 97p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola e do Ambiente) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – 2002.

RODRIGUEZ, D. R. O.; ANDRADE, G. C.; JURADO BELLOTE, A. F. J.; TOMAZELLO-FILHO, M. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (Pinus taeda L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.422, p.179–189, 2018.

REISSMANN, C. B. Exigências nutricionais nos plantios de Pinus. **Revista da Madeira**, Ed. Especial: Pinus, uma alternativa de mercado. Curitiba, v. 12, n. 68. dez. 2002.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: GONÇALVES, J. L. M. B. V. organizador. **Nutrição e fertilização florestal**. 3º ed Piracicaba: IPEF. p.135–166, 2015.

ROBERTSON, G.; GAULKE, P.; MCWILLIAMS, R.; LAPLANTE, S.; GULDIN, R. **National Report on Sustainable Forests** – 2010. 214p. United States Department of

Agriculture Forest Service Report FS-979. US Government Printing Office, Washington DC, 2011.

RODRIGUES, C. M.; BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; GOMES, F. S. Alterações na nutrição e na produtividade do *Pinus taeda* L. provocadas pela aplicação de resíduo celulósico. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n.51, p.131-143, Colombo, 2005.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; PELISSARI, A. L.; TOMÉ, M.; MASS, G. C. B.; SANQUETTA, M. N. I. Dinâmica em superfície, volume, biomassa e carbono nas florestas plantadas brasileiras: 1990-2016. **Biofix Scientific Journal**, v.3, n.1, p.152-160, 2018.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Produção de serapilheira e transferência de nutrientes em área de segunda rotação com floresta de *Pinus taeda* L. no município de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, v.18, p.471-480, 2008.

SIMS, T. Soil pH Effects on the Distribution and Plant Availability of Manganese, Copper, and Zinc. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.367-373, 1986.

SIXEL, R. M.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ANDRADE, G. R. P.; AZEVEDO, A. C.; STAHL, J.; MOREIRA, A. M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1416-1427, 2015.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and amazonian dark earths in Central Amazonia — Preliminary results. In: GLASER B., WOODS W.I. (eds) **Amazonian dark earths: Explorations in space and time**. p.195-212, 2004.

SYPERT, R. H. **Diagnosis of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Nutrient Deficiencies by Foliar Methods**. Virginia Polytechnic Institute and State University; 2006.

TEAM, R. D. C. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2014.

THIRUKKUMARAN, C. M.; PARKINSON, D. Microbial activity, nutrient dynamics and litter decomposition in a Canadian Rocky Mountain pine forest as affected by N and P fertilizers. **Forest Ecology and Management**, v.159, p.187-201, 2002.

THOMÉ, V. M. R.; ZAMPIERI, S.; BRAGA, J. H.; PANDOLFO, C.; SILVA JÚNIOR, V. P.; BACIC, I.; LAUS NETO, J.; SOLDATELI, D.; GEBLER, D.; ORE, J. D.; ECHEVERRIA, L.; MATTOS, M.; SUSKI, P. P. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, v.1000. p.1000. CD-ROOM, 1999.

VAN BREEMEN, N.; FINLAY, R.; LUNDSTRÖM, U.; JONGMANS, A. G.; REINER, G.; OLSSON, M. Mycorrhizal weathering: A true case of mineral plant nutrition? **Biogeochemistry**, v.49, p.53-67, 2000.

VANGUELOVA E. I.; HIRANO, Y.; ELDHUSET, T. D.; SAS-PASZT, L.; BAKKER, M. R.; PÜTTSEPP, Ü.; BRUNNER, I.; LÖHMUS, K.; GODBOLD, D. Tree fine root Ca/Al molar ratio - Indicator of Al and acidity stress. **Plant Biosystems**, v.141, p.460–480, 2007.

VANGUELOVA, E. I.; NORTCLIFF, S.; MOFFAT, A. J.; KENNEDY, F. Morphology, biomass and nutrient status of fine roots of Scots pine (*Pinus sylvestris*) as influenced by seasonal fluctuations in soil moisture and soil solution chemistry. **Plant and Soil**, v.270, p.233–247, 2005;

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; CIMELIO BAYER, C.; HIGA, R. C. V.; BREVILIERI, R. C.; COMERFORD, N. B.; STOPPE, A. M. Reforestation with loblolly pine can restore the initial soil carbon stock relative to a subtropical natural forest after 30 years. **European Journal of Forest Research**, v.137, n.5, p.593–604, 2018.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, v.19, p.375–382, 2009.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**, 34: 85-94, 2010.

WISNIEWSKI, C.; REISSMANN, C. B. Deposição de serapilheira e de nutrientes em plantios de *Pinus taeda* L. na região de ponta Grossa – PR. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, 39: 435- 442, 1996.

WANG, L.; KATZENSTEINER, K.; SCHUME, H.; VAN LOO, M.; GODBOLD, D. L. Potassium fertilization affects the distribution of fine roots but does not change ectomycorrhizal community structure. **Annals of Forest Science**, v.73, p.691–702, 2016.

WIENAND, K. T.; STOCK, W. D. Long-term phosphorus fertilization effects on the litter dynamics of an age sequence of *Pinus elliottii* plantations in the southern Cape of South Africa. **Forest Ecology and Management**, v.75, p.135-146, 1995.

WILKINSON, M. T.; RICHARDS, P. J.; HUMPHREYS, G. S. Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation. **Earth-Science Reviews**, v.97, p.257–272, 2009.

WINAGRASKI, E. Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaíva, PR. 68p. 2014.

YANAI R. D.; PHILLIPS, R. P.; ARTHUR, M. A.; SICCAM, T. G.; HANE, E. N. Spatial and temporal variation in calcium and aluminum in northern hardwood forest floors. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.160, p.109–118, 2005.